

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Juan Camilo Herrera Pineda

**OBTENÇÃO DOS MAPAS DA CAPACIDADE
DE FORÇA ISOTRÓPICA EM MANIPULADORES
SERIAIS PLANARES COM APLICAÇÕES
NA DEFINIÇÃO DA TAREFA.**

Florianópolis

2017

Juan Camilo Herrera Pineda

**OBTENÇÃO DOS MAPAS DA CAPACIDADE
DE FORÇA ISOTRÓPICA EM MANIPULADORES
SERIAIS PLANARES COM APLICAÇÕES
NA DEFINIÇÃO DA TAREFA.**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Me-
cânica para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Henrique Simas, Dr.
Eng.

Coorientador: Prof. Roberto Simoni,
Dr. Eng.

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Herrera, Juan Camilo

Obtenção dos mapas da capacidade de força
isotrópica em manipuladores seriais planares com
aplicações na definição da tarefa / Juan Camilo
Herrera ; orientador, Henrique Simas; coorientador,
Roberto Simoni - SC, 2017.

129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

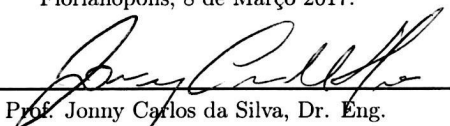
1. Engenharia Mecânica. 2. Força isotrópica. 3.
Capacidade de forças isotrópicas. 4. Método de
Davies. 5. Teoria de helicoides. I. Simas,
Henrique. II. Simoni, Roberto. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Juan Camilo Herrera Pineda


**OBTENÇÃO DOS MAPAS DA CAPACIDADE DE FORÇA
ISOTRÓPICA EM MANIPULADORES SERIAIS
PLANARES COM APLICAÇÕES NA DEFINIÇÃO DA
TAREFA.**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.


Florianópolis, 8 de Março 2017.



Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

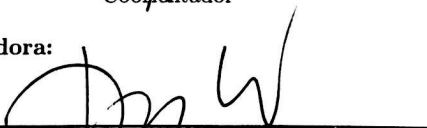


Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Orientador

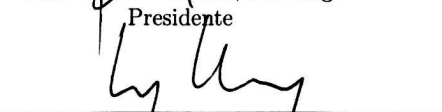


Prof. Roberto Simoni, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:



Prof. Daniel Martins, Dr. Eng.
Presidente



Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a monogram-like shape.

Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng.

Este trabalho é dedicado à minha família, minha namorada e amigos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter cumprido todos meus milagres.

Minha mãe Miriam de Jesus Pineda, pelo apoio, amor e compreensão durante todo esse período longe de casa.

À minha namorada Andrea Gil Martin, que me acompanhou em todas as dificuldades. Obrigado pelo apoio incondicional.

O meu amigo Leonardo Mejia, pelas contribuições valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus orientadores, Henrique Simas e Roberto Simoni, pelo conhecimento transmitido para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Daniel Martins, pela paciência e ajuda fornecida durante o início da minha dissertação.

O meu amigo Frank Ajata, pela companhia, pelo auxílio nas dificuldades e noites de estudo.

Ao pessoal do Laboratório de Robótica da Universidade Federal de Santa Catarina, pelas discussões e aportes feitos ao trabalho.

A meus amigos da Automação, pelos bons momentos que compartilhamos.

A todos os amigos, que nunca me deixam cair.

Finalmente, à CAPES e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC pela oportunidade e pelo apoio financeiro.

*"Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a
uma meta, não às pessoas nem às coisas".*

Albert Einstein

RESUMO

A interação de robôs pode se dar por meio da ação de forças estáticas, ou seja, quando não existem movimentos significativos entre o robô e o meio, ou dinâmica, quando o robô está em movimento mantendo o contato com o meio. Quando a movimentação é relativamente lenta, é possível considerar a interação como quase-estática, pois os efeitos dinâmicos podem ser desprezados. Nas tarefas em que se exige contato a baixas velocidades, especificações e estudos sobre a capacidade de gerar forças e momentos (ou simplesmente capacidade de força) de robôs tornam-se interessantes. Em muitos casos, durante a execução da tarefa, a capacidade de força pode estar abaixo das forças requeridas pela tarefa em algum ponto da trajetória, o que pode acarretar a ocorrência de danos materiais ou ferimentos em pessoas durante o processo. A capacidade de força nos robôs depende basicamente do potencial de geração torques, ou forças em seus atuadores de revolução ou prismáticos respectivamente e das direções das forças aplicadas. Neste sentido surge o conceito de forças isotrópicas, que consiste na máxima magnitude de força que um robô pode aplicar ou suportar em todas as direções de acordo com uma postura. O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método, para obtenção dos mapas da capacidade de forças isotrópicas em manipuladores seriais planares em condições estáticas ou quase-estáticas. O estudo será realizado utilizando robôs com estruturas cinemática do tipo 3R, 4R, 5R e 6R. O método proposto tem como resultado um mapa de indicação das maiores forças isotrópicas que podem ser exercidas dentro da área de trabalho do robô. Os resultados obtidos permitem alocar uma tarefa na região com maior capacidade de força isotrópica, garantindo que a força mínima requerida pela execução da tarefa seja atendida. Neste trabalho, a modelagem estática é realizada através da teoria de helicóides e do método de Davies. A capacidade de força isotrópica é calculada através do método denominado fator de escala modificado. O método proposto é estudado por meio de casos e validado comparando os resultados com os métodos pesquisados no referencial teórico.

Palavras-chave: Força isotrópica. Capacidade de forças isotrópicas. Método de Davies. Teoria de helicoides. Fator de escala modificado.

ABSTRACT

The interaction of robots can occur through the action of static forces, when there is no significant movement between the robot and the environment, or dynamics, when the robot is in motion while maintaining contact with the environment. When the movement is relatively slow, it is possible to consider the interaction as quasi-static, since the dynamic effects can be neglected. In tasks requiring contact at low speeds, specifications and studies on the robots' ability to generate forces and moments (or simply force capability) become interesting. In many cases, during the execution of the task, the force capability may be below the forces required by the task at some point in the trajectory, which can lead to material damage or injury people during the process. The capability of force in the robots depends basically on the potential of generation of torques, or forces in their revolute or prismatic actuators, respectively and on the directions of the applied forces. In this sense arises the concept of isotropic forces, which consists of the maximum magnitude of force that a robot can apply or support in all directions according to a posture. The main objective of this work is the development of a method to obtain the isotropic forces maps for planar serial manipulators under static or quasi-static conditions. The study will be performed using robots with kinematic structures of 3R, 4R, 5R and 6R type. The proposed method results in a map indicating the greatest isotropic forces that can be exerted within the workspace of the robot. The obtained results allow to allocate a task in the region with greater capability of isotropic force, ensuring that the minimum force required for the execution of the task is met. In this work, static modeling is performed through the screw theory and the Davies method. The isotropic force capability is calculated using the method called the modified scale factor. The proposed method will be applied to several case studies and validated by comparing the results obtained from it with the methods found in the literature.

Keywords: Isotropic force. Forces capabilities. Davies' method. Screw theory. Fator modified scale.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapeamento de elipsoides e politopos do espaço do atuador ou espaço da tarefa. Fonte: Firmani et al. (2008).....	32
Figura 2	Força desejada em um caso planar.	50
Figura 3	Efeitos de multiplicar uma força pura pelo fator de escala.	52
Figura 4	Manipulador serial planar tipo $3R$	61
Figura 5	Polígono da capacidade de força para o manipulador $3R$	63
Figura 6	Politopo da capacidade de força para o manipulador $3R$	64
Figura 7	Circunferência da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$	65
Figura 8	Cone duplo da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$	66
Figura 9	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 0°	68
Figura 10	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 45°	69
Figura 11	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 90°	70
Figura 12	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 180°	71
Figura 13	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 270°	72
Figura 14	Área da tarefa determinado por A, B e C e seus pontos N, P e Q	80
Figura 15	Rotação dos vetores unitários \vec{v} e \vec{w}	81
Figura 16	Alocação de um quadrado.	87
Figura 17	Alocação de um retângulo.	88
Figura 18	Alocação de uma linha.	89
Figura 19	Manipulador serial planar tipo $4R$	94
Figura 20	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 0°	96
Figura 21	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 45°	97
Figura 22	Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 90°	98

Figura 23 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 4R, com orientação do efetuador final igual a 180°	99
Figura 24 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 4R, com orientação do efetuador final igual a 270°	100
Figura 25 Manipulador serial planar tipo 5R.....	101
Figura 26 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 0°	103
Figura 27 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 45°	104
Figura 28 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 90°	105
Figura 29 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 180°	106
Figura 30 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 270°	107
Figura 31 Manipulador serial planar tipo 6R.....	108
Figura 32 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 0°	110
Figura 33 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 45°	111
Figura 34 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 90°	112
Figura 35 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 180°	113
Figura 36 Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 270°	114
Figura 37 Alocação de um quadrado no mapa do manipulador 4R.....	116
Figura 38 Alocação de um retângulo no mapa do manipulador 5R.....	116
Figura 39 Alocação de uma linha no mapa do manipulador 6R. ..	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparativo entre os métodos apresentados para a otimização da capacidade de força-momento de manipuladores.....	60
Tabela 2	Parâmetros do manipulador planar serial de $3R$	62
Tabela 3	Parâmetros do algoritmo da ED empregados para alocação da tarefa.	78
Tabela 4	Parâmetros das tarefas para o manipulador $3R$	90
Tabela 5	Parâmetros do manipulador planar serial de tipo $4R$...	95
Tabela 6	Parâmetros do manipulador planar serial de tipo $5R$...	102
Tabela 7	Parâmetros do manipulador planar serial de tipo $6R$...	109
Tabela 8	Comparação dos tempos de cálculo necessários para a obtenção dos mapas.	115
Tabela 9	Parâmetros das tarefas para manipuladores redundantes.	117

LISTA DE ABREVIATURAS

DoF	Graus de liberdade (<i>degree of freedom</i>)
ED	Evolução diferencial
QP	Programação quadrática
MAV	Valor máximo disponível
MIV	Valor máximo isotrópico
PM	Manipulador planar
PPM	Manipulador paralelo planar
SVD	Decomposição em valores singulares

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_{crit}	Ângulo crítico
θ	Ângulo de aplicação da força
$\tau_{i_{ext}}$	Capacidade de ação extrema em uma junta
x, y	Coordenadas cartesianas
ψ_i	Fator de escala para uma junta saturada i
F	Força
f_{av}	Força disponível
f_x	Força em x
f_y	Força em y
f_z	Força em z
F_T	Força em função do ângulo
f_{is}	Força isotrópica
F_{app}	Força máxima com um momento determinado
f_{obj}	Função objetivo
$\$$	Helicoide
$\A	Helicoide de ação (heliforça)
$\$F$	Helicoide de força
$\M	Helicoide de movimento(heligi-ro)
f_{app}	Intensidade da força
f_m	Intensidade de F_m
J	Jacobiano
S	Junta esférica
R	Junta rotativa
U	Junta universal
$^{pm}F_{av}$	Máxima força disponível
$^{pm}F_{is}$	Máxima força isotrópica
F_{iso}	Máxima força isotrópica
F_m	Máxima força para uma dada orientação
Ψ	Máximo fator de escala
$^{af}M_z$	Máximo momento
$^{pi f}M_z$	Máximo momento isotrópico
M	Mobilidade

m	Momento
$m_i(\theta)$	Momento da junta i em função do ângulo
m_x	Momento em x
m_y	Momento em y
m_z	Momento em z
M_z	Momento em z
ϕ	Orientação do efetuador final
\mathbb{R}^2	Plano bidimensional
\mathbb{R}^3	Plano tridimensional
P	Politopo
τ_i	Torque da junta i
τ_θ	Torque em função do ângulo
$\tau_{i_{max}}$	Torque máximo da junta i
$\tau_{i_{min}}$	Torque mínimo da junta i
\dot{q}	Velocidades
v	Vértices
\vec{f}	Vetor de forças
\vec{m}_o	Vetor de momentos
\vec{w}_n	Vetor de velocidades angulares
\vec{v}_o	Vetor de velocidades lineares
τ	Vetor dos torques dos atuadores do manipulador

CONTEÚDO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	29
1.1.1 Otimização com Restrição	29
1.1.2 Elipsoide de Força	30
1.1.3 Politopo de Força	31
1.2 MOTIVAÇÃO	34
1.3 OBJETIVOS	34
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	35
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1 CAPACIDADE DE FORÇA	37
2.1.1 Índice de desempenho cinestoeestáticos	38
2.1.1.1 Elipsoide de velocidade	39
2.1.1.2 Número de condição	39
2.1.1.3 Mínimo valor singular	40
2.1.1.4 Índice de compatibilidade	40
2.1.1.5 Índice de manipulação	41
2.1.2 Abordagem clássica da isotropia	42
2.1.2.1 Robô isotrópico	42
2.1.2.2 Propriedades cinestostáticas	43
2.1.2.3 Velocidade isotrópica	43
2.1.2.4 Força isotrópica	44
2.1.2.5 Repetibilidade isotrópica	44
2.1.2.6 Massa isotrópica	45
2.1.2.7 Rigidez isotrópica	45
2.2 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	47
3 CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA EM MANIPULADORES USANDO O MÉTODO DE FATOR DE ESCALA MODIFICADO	49
3.1 MÉTODO DO FATOR DE ESCALA CLÁSSICO	49
3.2 MÉTODO DO FATOR DE ESCALA MODIFICADO	52
3.2.1 Momento máximo imposto	55
3.3 MÁXIMA CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA	56
4 MAPAS DE FORÇA ISOTRÓPICA DO ROBÔ 3R	61
4.0.1 Máxima capacidade de força com $m_z = 0$	62
4.0.2 Máxima capacidade de força com $m_z \neq 0$	63
4.0.3 Máxima capacidade de força isotrópica com $m_z = 0$	64
4.0.4 Máxima capacidade de força isotrópica com $m_z \neq 0$	65

4.0.5 Geração dos mapas das forças isotrópicas	66
4.1 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	73
5 MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DA TAREFA NAS REGIÕES DO MAPA COM MAIOR CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA VIA EVOLUÇÃO DIFE- RENCIAL	75
5.1 ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DO AL- GORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	76
5.1.1 Escolha do tamanho da população	76
5.1.2 Escolha do fator de escala para o algoritmo de evo- lução diferencial	77
5.1.3 Escolha do fator de cruzamento	77
5.2 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO E TRATAMENTO DAS RESTRIÇÕES	78
5.2.1 Definição da função objetivo para alocação da tarefa	79
5.3 ALOCAÇÃO DA TAREFA	79
5.3.1 Algoritmo da alocação da tarefa	84
5.3.2 Alocação da tarefa	85
6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM MANIPULADO- RES PLANARES SERIAIS REDUNDANTES DE TIPO 4R, 5R E 6R.....	91
6.1 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA DETERMI- NAR A MÁXIMA FORÇA ISOTRÓPICA NOS MANIPU- LADORES REDUNDANTES	92
6.2 GERAÇÃO DOS MAPAS DAS FORÇAS ISOTRÓPICAS PARA MANIPULADORES REDUNDANTES.....	93
6.2.1 Manipulador serial planar tipo 4R	94
6.2.2 Manipulador serial planar tipo 5R	101
6.2.3 Manipulador serial planar tipo 6R	108
6.2.4 Alocação da tarefa	115
6.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	118
7 CONCLUSÕES.....	119
7.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	120
7.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	120
7.3 PUBLICAÇÕES	121
Referências	123

1 INTRODUÇÃO

A maior parte dos robôs industriais são essencialmente braços articulados programáveis, capazes de realizar múltiplas tarefas. Como exemplo, pode-se citar a movimentação de materiais, a soldagem de peças, montagens mediante deslocamentos, entre outros. Estas tarefas podem ser classificadas em duas classes. A primeira classe é constituída pelas tarefas que não têm contato com o meio, elas têm movimento livre, sem restrições na área de trabalho do manipulador. Entre estas tarefas, a dinâmica do robô é o aspecto mais importante para seu desempenho. A segunda classe é composta pelas tarefas que têm contato com o meio, onde o efetuador final estabelece contato físico com os objetos no ambiente para exercer um processo de força, tais como usinagem, polimento de peças, entre outros. Este tipo de força pode ser controlado com as posições e orientações das juntas e do efetuador final, a fim de evitar sobrecarga ou de danificar as ferramentas ou os objetos a serem fabricados (ROMANELLI, 2011).

A mobilidade de um manipulador serial é associado ao número de juntas (WEIHMANN et al., 2011b). Quando um manipulador possui um número de juntas maior que o necessário para realizar uma tarefa, esse manipulador é dito redundante. A utilização de manipuladores redundantes em processos industriais tem como vantagens a programação de tarefas secundárias, tais como o evitamento de colisões ou o aumento das possibilidades de movimentos e posicionamentos (SIMAS et al., 2008). Dentre as tarefas secundárias, a alteração de posturas pode ser utilizada para melhorar o desempenho sobre uma trajetória (SCIAVICCO; SICILIANO, 2012). É possível melhorar a postura de um robô utilizando estratégias de controle para geração de trajetórias. Porém, o tratamento da redundância não é simples e sua solução tem várias abordagens metodológicas e matemáticas (SIMAS et al., 2008).

Um dos inconvenientes dos manipuladores redundantes é o cálculo da cinemática inversa, que apresenta infinitas soluções. Isso implica que, para uma dada orientação do efetuador final, é possível induzir um movimento na estrutura sem mudar posição. Portanto, o braço pode ser reconfigurado para encontrar melhores posturas dentro de um conjunto de tarefas designadas. De modo, que se uma trajetória precisa do movimento do efetuador final, em princípio é possível modificar continuamente o deslocamento das juntas em conjunto com o efetuador final

para que o processo seja executado corretamente e com a maior eficiência possível, realizando a tarefa de restrição adequada para a postura do manipulador em cada ponto da sua trajetória (SCIAVICCO; SICILIANO, 2012). Por exemplo, em um processo de polimento de peças executado por um robô redundante, a mesma posição e orientação sobre a trajetória podem ser alcançadas por um número infinito de posturas do robô. Dentro deste contexto, existe a necessidade de controlar os movimentos das juntas, as forças presentes no efetuador em contato com a trajetória e avaliar a capacidade de força requerida para execução da tarefa.

O tema principal desta dissertação é a geração de mapas que permitam indicar as regiões com maior capacidade de força isotrópica no plano xy para manipuladores seriais planares de tipo 3R, 4R, 5R e 6R dentro seu espaço de trabalho. A obtenção dos mapas da máxima força isotrópica servirá como base para o desenvolvimento de um método que permita alocar uma tarefa dentro da área com maior capacidade de força isotrópica, com o propósito de garantir a força mínima requerida para a execução da tarefa.

A análise estática de um mecanismo é baseada nas equações de equilíbrio, que permitem determinar as forças internas a partir do valor das forças externas. Existem diferentes métodos para o cálculo da estática em manipuladores. Como exemplo, pode-se citar o método vetorial, vetores duais e quatérnions duais e o método de Davies através de helicoides. Nesta dissertação, será desenvolvida a estática pelo método de Davies, devido à sua praticidade no tratamento de um sistema de forças que age sobre um mecanismo (MEJIA, 2012).

A alteração da postura de um manipulador redundante pode influenciar de forma direta a capacidade de força, permitindo que algumas posturas apresentem melhor desempenho que outras. Técnicas de otimização podem ser usadas para identificar as posturas que apresentam melhor desempenho. A estrutura apresentada neste trabalho está baseada em um algoritmo de otimização evolucionário usado para a minimização de funções não-lineares e não diferenciáveis no espaço contínuo, conhecido como o algoritmo de Evolução Diferencial (*ED*).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A análise da capacidade de força de um manipulador serial depende de seu desenho, postura e a capacidade de torques em seus atuadores. O estudo da capacidade de força tem sido abordado de três formas diferentes: otimização com restrição, elipsoide de força e polítopo de força (FIRMANI et al., 2008).

1.1.1 Otimização com Restrição

A otimização com restrição utiliza uma função objetivo que maximiza a magnitude da força (F) ou o momento (m_z), uma igualdade de restrição ($F = J^{-T} \tau$) e um conjunto de restrições de desigualdade ($\tau_{i_{min}} \leq \tau_i \leq \tau_{i_{max}}$), indicando a capacidade de força-momento nos atuadores. Vários estudos abordam esta forma e alguns são mencionados na sequência deste trabalho.

A distribuição da força nos atuadores redundantes de cadeia fechada foi investigada por Kumar e Waldron (1988). No trabalho citado, demonstra-se que as forças internas são nulas usando a solução inversa generalizada Moore-Penrose. O desenvolvimento de um algoritmo para determinar o mínimo torque necessário para suportar uma carga comum entre dois manipuladores cooperativos foi feito por Tao e Luh (1989). Nahon e Angeles (1992) propõem a utilização de programação quadrática (QP) para ser utilizado como um ponto de ajuste de força em uma mão planar segurando um objeto. As metodologias propostas por Weihmann et al. (2011a) e Mejia, Simas e Martins (2014), foram usadas para avaliar a capacidade de força em manipuladores paralelos planares por meio de algoritmos de evolução diferencial (ED). A análise da capacidade de força de um manipulador redundante paralelo (PPM) feito por Buttolo e Hannaford (1995), apresenta um algoritmo computacionalmente eficiente para maximizar a força desejada e conseguir uma força homogênea no espaço de trabalho do manipulador. Nokleby et al. (2005) desenvolveu uma metodologia baseada no uso de fatores de escala para determinar a capacidade de força de manipuladores paralelos redundantes e não redundantes. Esta metodologia permite introduzir os limites dos atuadores sobre o problema para determinar a capacidade de força. Garg, Carretero e Nokleby (2007) implementaram esta abordagem em manipuladores paralelos espaciais.

Em geral, os métodos que usam otimização com restrição, são lentos, devido à natureza numérica do algoritmo e às imprecisões devido à existência de mínimos locais. Mejia et al. (2015) apresentaram um novo método, que determina a capacidade de força, reduzindo tempo e esforço para resolver o problema, evitando o uso de algoritmos de otimização. Este método é baseada na metodologia do fator de escala clássico, apresentado por Nokleby et al. (2007), oferecendo algumas melhoras para resolver o problema da capacidade de força de forma mais fácil, rápida e direta, em conjunto com o método de Davies. Este método foi utilizado neste trabalho como base para a obtenção das forças isotrópicas em manipuladores seriais planares redundantes e não redundantes, de forma mais rápida e direta.

1.1.2 Elipsoide de Força

O elipsoide de força representa um mapeamento entre os torques dos atuadores e as ações correspondentes do efetuador final. De tal forma que quando uma unidade de torque é aplicada nas juntas ativas por meio da hiperesfera unitária $\tau^T \tau \leq 1$, os torques são mapeados dentro o espaço da força usando $\tau = J^T F$, produzindo um elipsoide de força $F^T J J^T F \leq 1$, cujos eixos principais coincidem com os autovetores de $J J^T$ e cujos comprimentos destes eixos são obtidos através do inverso da raiz quadrada de seus autovalores (TSAI, 1999).

Algumas considerações devem ser feitas quanto à aplicação do elipsoide de força:

- Esta abordagem só pode ser aplicada quando o manipulador apresenta um único tipo de junta. Quando o manipulador tem dois tipos, como exemplo juntas prismáticas e rotativas, o mapeamento apresenta incoerência dimensional e não pode ser aplicado.
- Não são impostas restrições quanto ao torque máximo suportado por cada atuador. Alguns pontos dentro o espaço de força não podem ser alcançados e, conseqüentemente, a elipse de forças não representa a condição real.
- Para robôs com redundância cinemática, os torques das juntas

ativas não podem ser determinados de forma independente. Portanto, existem pontos da relação que não podem ser obtidos.

- Não considera o peso dos elos. Os torques necessários para equilibrar as forças gravitacionais são omitidos, podendo conduzir a resultados errôneos.

Independentemente de que existam condições a serem consideradas em sua utilização, o elipsoide de força pode fornecer um bom indicativo da vantagem mecânica apresentada por um manipulador. Informações sobre direções onde o manipulador possui maior capacidade em aplicar força podem servir como orientação na busca de soluções otimizadas para aplicação de forças e momentos controlados. Esta abordagem foi apresentada por Yoshikawa (1985), ele introduziu medidas que determinam a capacidade de força e velocidade do efetuador final em manipuladores seriais. Yoshikawa (1990) também apresentou a dualidade entre elipsoide de velocidade e elipsoide de força, concluindo que os eixos dos elipsoides coincidem, mas seus comprimentos são inversamente proporcionais.

Chiacchio et al. (1991) fizeram uma análise completa do elipsoide de força para sistemas de múltiplos braços cooperativos, que permite a descrição global das forças internas e externas dentro do espaço de trabalho dos manipuladores. Lee e Kim (1991) para a velocidade e Chiacchio, Bouffard-Vercelli e Pierrot (1996) para a força estática, propõem normalizar as variáveis espaciais em conjuntos de velocidades e torques respectivamente, quando os atuadores não originam a mesma saída. Como resultado, o elipsoide resultante é definido como a pré-imagem da unidade esférica para o conjunto das variáveis espaciais. O elipsoide de força pode ser implementado de forma fácil e a resolução é imediata. No entanto, esta abordagem é uma aproximação pois o conjunto de torques são normalizados $\tau^T \tau \leq 1$, obtendo-se uma hipersfera no espaço do torque. O modelo correto do conjunto de torques deve ser um paralelepípedo m-dimensional no espaço de torque, devido à natureza das capacidades torques extremos de cada atuador, isto é (τ_{max}) ou (τ_{min}) .

1.1.3 Politopo de Força

O politopo de força representa o mapeamento exato da capacidade de força ou de velocidade onde o manipulador pode operar. Uma

comparação entre o elipsoide e o politopo é mostrado na Figura 1. Assumindo um manipulador com duas juntas rotativas cujas capacidades extremas são $\tau_{i_{ext}} \leq \pm 1 |N_m|$, para $i = 1, 2$. A Figura (1.a) mostra a geração de uma elipse como resultado de um mapeamento circular (hiperesfera). A Figura (1.b) mostra a geração de um politopo como resultado de um mapeamento quadrado (hipercubo). Cada trama contém dois sistemas de coordenadas.

O círculo interno da Figura (1.a) e o quadrado interno da Figura (1.b) descrevem os limites dos torques dentro do espaço, no eixo horizontal $Limites \tau_1 [N_m]$, e no eixo vertical $Limites \tau_2 [N_m]$; considerando que a elipse e polígono descrevem a capacidade de força dentro do espaço do torque, no eixo superior $f_x [N]$ e no eixo da direita $f_y [N]$. As linhas que ligam o interior das formas exteriores, ilustram a transformação linear. Observe como as bordas e vértices do quadrado e polígono correspondem em ambos espaços. As áreas compreendidas para estas formas geométricas representam as capacidades viáveis em seus espaços correspondentes. O quadrado é uma representação exata das capacidades de torque, enquanto o círculo é uma aproximação. Como exemplo, uma combinação de torques viáveis $\tau_1 = \tau_2 = 1 |N_m|$ são incluídas na Figura (1.b) do quadrado, enquanto na Figura (1.a) do círculo esta combinação não está incluída. Assim, a modelagem das capacidades de torque como um quadrado é melhor do que um círculo. A Figura (1.c) mostra como o círculo e elipse estão inscritos dentro do quadrado e do polígono, respectivamente. É importante mencionar que os eixos principais da elipse são alinhados com os vértices do polígono.

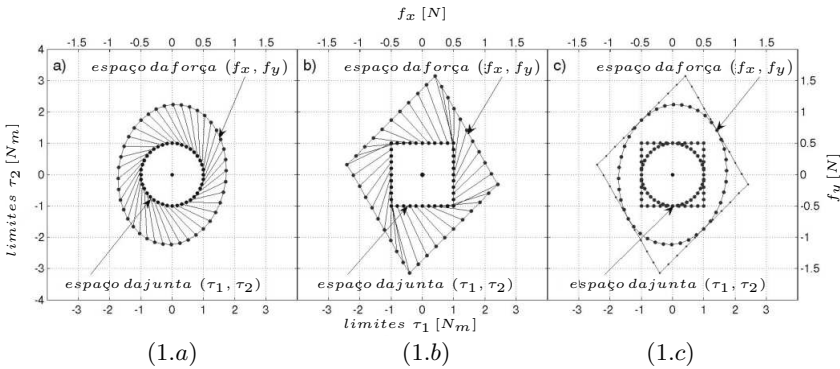


Figura 1 – Mapeamento de elipsoides e politopos do espaço do atuador ou espaço da tarefa. Fonte: Firmani et al. (2008)

Um politopo é uma região convexa, isto é, quaisquer dois pontos dentro do politopo podem ser ligados por uma linha que está contida completamente no interior do politopo. Um politopo n -dimensional é delimitado por $(n-1)$ faces dimensionais ou hiperplanos. Por exemplo, arestas lineares em \mathbb{R}^2 delimitam um polígono, ao passo que as facetas planares em \mathbb{R}^3 delimitam um poliedro.

Dessa forma, cada torque do atuador define um eixo ortogonal no espaço \mathbb{R}^m . Os extremos de cada torque limitam esse espaço com um par de planos paralelos ao longo de cada eixo. A região viável no qual o manipulador pode operar é limitada por estes pares de planos paralelos, produzindo um paralelepípedo m -dimensional.

Rockafellar (1997) estudou as propriedades dos poliedros convexos. A partir de sua análise, a seguinte relação é realizada através de uma transformação linear: "Seja τ o paralelepípedo m -dimensional (um conjunto convexo) e J^{-T} a transformação linear de \mathbb{R}^m para \mathbb{R}^n . Em seguida, a transformação resultante $J^{-T}\tau$ leva a um outro conjunto de poliedros convexos (F) em \mathbb{R}^n o qual contém um número infinito de fatores".

O conceito do politopo convexo de velocidade e força foi introduzido por Kokkinis e Paden (1989), onde a análise foi aplicada em um manipulador serial e dois manipuladores cooperativos. Lee (1997) propôs um método para a determinação dos vértices dos politopos de giro usando álgebra vetorial. Hwang, Lee e Hsia (2000) desenvolveram um algoritmo que gera o politopo de giro em manipuladores seriais. Outros estudos sobre politopos foram feitos por Chiacchio, Bouffard-Vercelli e Pierrot (1997), onde os politopos de força de manipuladores seriais redundantes foram analisados. Finotello et al. (1998) apresentaram dois conjuntos de índices que podem ser implementados para politopos de giro e força: o valor máximo isotrópico (MIV) e o valor máximo disponível (MAV). Para manipuladores de 6-DOF, (FINOTELLO et al., 1998) propôs analisar tais índices considerando a força e o momento como entidades separadas.

Vários estudos abordam este conceito, como exemplo Gallina, Rosati e Rossi (2001) fizeram um mapeamento de forças usando o politopo para um manipulador de 3-DOF planar atuado por cabos. Lee e Shim (2004) consideram as restrições dinâmicas para a análise de manipulação de sistemas robóticos composta por braços cooperativos. Esta análise consiste em derivar os limites de aceleração da tarefa para o transporte do objeto pelos sistemas através do politopo. Krut, Pierrot et al. (2004) analisaram o conceito de velocidade isotrópica para mecanismos paralelos com atuação redundante, eles propuseram utilizar

o elipsoide maior incluído no polítipo para melhorar as representações de capacidade para mecanismos paralelos. Krut, Company e Pierrot (2004) estudaram os índices de desempenho de força em manipuladores paralelos redundantes e determinaram os espaços de trabalho das forças isotrópicas em manipuladores planares atuados por cabos. Firmani et al. (2008) derivou um conjunto de indicadores para o desempenho da força em manipuladores paralelos redundantes através da interpretação geométrica de seus politopos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Uma das vantagens que os manipuladores redundantes apresentam é a programação de tarefas secundárias, tais como evitar colisões, aumento das possibilidades de movimento e posicionamento das juntas, entre outras. Estas tarefas podem levar a melhorias em diversas análises, tais como configurações singulares, controle de forças e calibração (MERLET, 1996).

Este tipo de manipulador tem infinitas soluções de cinemática inversa para o planejamento de trajetórias, sendo esta uma desvantagem na escolha do ponto de referência para a análise da capacidade de força, necessitando de um algoritmo de otimização para determinar as melhores forças de operação. No entanto, a obtenção de uma solução ótima para aplicações relativamente simples ainda é um desafio para os pesquisadores. Assim, vários métodos têm sido propostos na literatura utilizando algoritmos de otimização com restrição (WEIHMANN et al., 2011a).

O interesse pelo tema surgiu da necessidade de um mapeamento de forças como ponto de referência para execução de uma tarefa sem ultrapassar os limites de força do manipulador. Na literatura há algumas abordagens referentes à otimização da capacidade de força para alguns manipuladores específicos. Porém, não se consideram as alterações de postura nem da melhor posição dentro do espaço de trabalho para melhorar o desempenho de força durante execução da tarefa. Dessa forma, os resultados obtidos no presente trabalho contribuem para a resolução do problema citado.

A aplicabilidade de diversas ferramentas como o método de Davies, o fator de escala modificado, e o algoritmo de Storn e Price (1997) facilitam o desenvolvimento de métodos que podem ser aplicadas em trabalhos futuros.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a obtenção dos mapas da capacidade de forças isotrópicas para manipuladores seriais planares de tipo 3R, 4R, 5R e 6R como um ponto de referência para a alocação de tarefas a ser executadas.

Os objetivos específicos são:

- Propor um método de otimização da capacidade de força isotrópica para robôs seriais planares de tipo 3R, 4R, 5R e 6R;
- Analisar o comportamento da capacidade de força isotrópica em relação às propriedades geométricas dos manipuladores seriais planares de tipo 3R, 4R, 5R e 6R;
- Propor um método para alocar uma tarefa na área com maior capacidade de força isotrópica possível, como ponto de referência para sua execução.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, a revisão bibliográfica, a motivação e os objetivos do presente trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados estudos sobre os fundamentos teóricos do problema da capacidade de força. Uma breve revisão sobre o índice de desempenho cinestostático e um abordagem clássica da isotropia.

No Capítulo 3 é apresentado o método para determinar a capacidade de força isotrópica em um manipulador serial planar de tipo 3R.

O Capítulo 4 mostra a aplicação do método para obtenção dos mapas de forças isotrópicas no manipulador serial planar 3R. Resultados dos testes de simulação são discutidos.

No Capítulo 5 é apresentado o método para a alocação da tarefa no mapa de forças isotrópicas para o manipulador serial planar 3R. Resultados dos testes de simulação são discutidos.

No Capítulo 6 é apresentada a aplicação dos métodos dos Capítulos 4 e 5 para manipuladores planares seriais redundantes 4R, 5R e 6R.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e aspectos sobre trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAPACIDADE DE FORÇA

A capacidade de força é definida como a ação de (força/momento) máximo que o manipulador pode aplicar ou suportar em uma determinada postura, sem ultrapassar os limites dos atuadores (NOKLEBY et al., 2005). Para relacionar a força-momento que atua no referencial do efetuador final do manipulador, podemos definir o seguinte:

$$[F] = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T \quad (2.1)$$

onde $f_x \ f_y \ f_z$ são as forças ao longo dos eixos x , y e z do referencial do efetuador final, e $m_x \ m_y \ m_z$ são os momentos nos eixos x , y e z do referencial do efetuador final. Da mesma forma, podemos definir o seguinte:

$$[D] = [d_x \ d_y \ d_z \ \delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T \quad (2.2)$$

a matriz $[D]$, contem os deslocamentos e rotações sobre os eixos x , y e z do referencial do efetuador final. Podemos também definir entidades similares para as articulações, como:

$$[\tau] = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5 \ \tau_6]^T \quad (2.3)$$

a matriz $[\tau]$, contem os torques das juntas do manipulador, e:

$$[D_\theta] = [d\theta_1 \ d\theta_2 \ d\theta_3 \ d\theta_4 \ d\theta_5 \ d\theta_6]^T \quad (2.4)$$

descreve os movimentos diferenciais nas juntas, seja um ângulo para uma junta rotativa, ou um deslocamento linear para uma articulação prismática. Usando o método de trabalho virtual (PYTEL; KIUSALAAS, 1999), indica que o trabalho virtual total nas juntas deve ser o mesmo trabalho virtual total no referencial do efetuador final, de tal forma que:

$$\delta W = [F]^T [D] = [\tau]^T [D_\theta] \quad (2.5)$$

onde as forças e momentos multiplicadores pelos deslocamentos no referencial do efetuador final são iguais aos torques multiplicados pelos deslocamentos nas juntas. A definição do jacobiano é apresentado como:

$$[D] = [J] [D_\theta] \quad (2.6)$$

de tal forma que substituindo a equação (2.6) em (2.5), obtemos a equação seguinte:

$$[F]^T [J] [D_\theta] = [\tau]^T [D_\theta] \rightarrow [F]^T [J] = [\tau]^T \quad (2.7)$$

se nós transpusermos ambos lados da equação (2.7), obtermos o seguinte resultado:

$$[\tau] = [J]^T [F] \quad (2.8)$$

A partir da equação (2.8), um problema pode ser formulado: qual é a máxima (força/momento) que o efetuador final pode realizar sem ultrapassar os limites dos atuadores. O conhecimento deste problema, permitiu desenvolver ferramentas importantes para conhecer o potencial da geração de torques ou forças em seus atuadores e as direções das forças aplicadas no efetuador final. Além disso, surgiu o conceito da força isotrópica o qual consiste na máxima magnitude de força que o efetuador final pode aplicar ou suportar em todas as direções de acordo a postura do manipulador.

O ponto central deste trabalho são as capacidades de forças isotrópicas nos manipuladores seriais planares com redundância cinemática ou não. Neste trabalho, o método de fator de escala clássico feito por Nokleby et al. (2005) e o método de fator de escala modificado feito por Mejia et al. (2015) são estudados para o desenvolvimento matemático que determina a máxima força isotrópica. Estes métodos são apresentados nos capítulos 3 e 4.

Antes de continuar, serão discutidos alguns conceitos importantes que permitem validar o desempenho dos manipuladores seriais a partir dos índices cinestostáticos, também alguns conceitos sobre isotropia serão apresentados neste capítulo, o texto aqui desenvolvido é baseado nos artigos de Moreno et al. (2012), Legnani et al. (2010) e Fassi, Legnani e Tosi (2005).

2.1.1 Índice de desempenho cinestoeestáticos

Os índices de desempenho cinestoeestáticos permitem avaliar a capacidade do manipulador. A maioria destes índices são definidos

em termos da matriz jacobiana do manipulador para determinar as relações de velocidade e força entre as juntas e o efetuador final. Os elementos da matriz jacobiana dependem da postura do manipulador e sua topologia.

2.1.1.1 Elipsoide de velocidade

O elipsoide de velocidade foi proposto por Yoshikawa (1985) para definir os índices de manipulação. Assumindo que o modelo de velocidade de um manipulador é:

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (2.9)$$

onde \dot{x} é o vetor de velocidades do efetuador final, \dot{q} é o vetor de velocidades das juntas e J é a matriz jacobiana. O elipsoide de velocidade é definido pelo conjunto de velocidades produzidas pelo efetuador final para uma determinada velocidade nas juntas, o qual satisfaz a seguinte condição:

$$\dot{x}J^T J\dot{x} \leq 1 \quad (2.10)$$

Através da decomposição da matriz jacobiana em valores singulares $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, é possível mostrar que estes valores correspondem às magnitudes dos eixos principais do elipsoide de velocidade. Os valores singulares também correspondem as raízes quadráticas dos autovalores da matriz $J^T J$.

Uma matriz jacobiana é singular, quando um de seus valores singulares é igual a zero. Cada vez que um manipulador serial está em uma configuração singular, perde um grau de liberdade ou seja, perde a capacidade de gerar movimentos em certas direções (MORENO et al., 2012).

2.1.1.2 Número de condição

O número de condição foi proposto por Salisbury e Craig (1982) para o projeto dos dedos de uma mão robótica. O número de condição k de uma matriz jacobiana é dada pela seguinte forma:

$$k(J) = \|J\| \times \|J^{-1}\| \quad (2.11)$$

onde $\|\cdot\|$ é a norma da matriz. Esta norma pode ser substituída pela norma de Frobenius:

$$\|J\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |J_{ij}|^2} \quad (2.12)$$

onde J_{ij} representa o elemento da i -ésima fila e j -ésima coluna da matriz J . Além disso, o número de condição pode ser calculado em função dos valores singulares da matriz jacobiana, de tal forma que:

$$k = \frac{\sigma_M}{\sigma_m} \quad (2.13)$$

onde σ_M é o máximo valor singular e σ_m é o mínimo valor singular. Quando o número de condição alcança o valor mínimo, diz-se que a matriz jacobiana é isotrópica. Se a matriz jacobiana é singular o número de condição vai para infinito. No caso que a matriz jacobiana seja isotrópica, o elipsoide de velocidade é convertido em uma esfera.

O número de condição permite medir a precisão do controle do manipulador e a distribuição uniforme das velocidades e forças operacionais (SALISBURY; CRAIG, 1982). Esta característica é importante nas tarefas de usinagem (CHABLAT; WENGER, 2003; HUANG; WHITEHOUSE; WANG, 1998). O número de condição é utilizado frequentemente como critério para o projeto de manipuladores isotrópicos (ZANGANEH; ANGELES, 1997; BARON; BERNIER, 2001; HUANG et al., 2004; MORENO; PAMANES, 2011). Este número é aplicado no contexto da inversão cinemática e planificação do movimento (CHABLET; WENGER; ANGELES, 1998; GOSSELIN; ANGELES, 1990; MORENO et al., 2006). Para manipuladores que têm diferentes soluções na cinemática inversa, o número da condição pode ser utilizado para escolher o melhor modo de trabalho do manipulador (CHABLAT; WENGER, 1998; CHABLAT et al., 2002).

2.1.1.3 Mínimo valor singular

O mínimo valor singular foi proposto por Klein e Blaho (1987) como índice de desempenho. Este índice permite verificar se a configuração do manipulador se aproxima a uma singularidade, indicando a magnitude dos eixos principais do elipsoide que estão a ponto de desaparecer. O volume do elipsóide de velocidade será maior quando o valor do índice seja maior (MORENO et al., 2012).

2.1.1.4 Índice de compatibilidade

O índice de compatibilidade foi proposto por Chiu (1988) para procurar configurações do manipulador que sejam mais compatíveis com a tarefa, em termos de força e velocidade. Chiu (1988) introduz o conceito da relação de transmissão, o qual permite determinar a capacidade do manipulador para gerar forças e velocidades nas direções definidas pela tarefa. A relação de transmissão ao longo de uma determinada direção é igual a distância que existe entre o centro do elipsoide de força ou velocidade, até a superfície dele mesmo na mesma direção. A relação da de transmissão de força está definida pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{u^T (J J^T) u}} \quad (2.14)$$

onde u indica o vetor unitário na direção de interesse. Além disso, a relação de transmissão é definida da seguinte forma:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{u^T (J J^T)^{-1} u}} \quad (2.15)$$

No caso especial em que u coincida com um dos eixos principais do elipsoide, β pode ser calculado como o recíproco de α para evitar a inversão da matriz. Desta forma Chiu (1988) explica, se o objetivo é controlar as forças ao longo de uma direção determinada que está definida por u_i , onde $(i = 1, \dots, p)$ e a velocidade que está definida por u_j , onde $(j = l + 1, \dots, q)$, então o índice é otimizado em função as relações de transmissão correspondentes às direções. Neste caso é definido o índice de compatibilidade como:

$$c = \sum_{i=1}^p w_i \alpha_i^{\pm 2} + \sum_{j=l+1}^q w_j \beta_j^{\pm 2} \quad (2.16)$$

O sinal $+$ é utilizado nas direções em que seja importante a magnitude, o sinal $-$ é utilizado nas direções que seja importante a precisão do controle, w_i e w_j , são os fatores de ponderação que indicam a importância de alcançar a maior magnitude ou precisão em certas direções da tarefa. As relações de transmissão representam a amplificação da magnitude de força e velocidade no efetuador final. Os recíprocos das relações de transmissão representam uma medida na precisão do controle (MORENO et al., 2012).

2.1.1.5 Índice de manipulação

O índice de manipulação foi proposto por Yoshikawa (1985). O objetivo deste índice é medir a capacidade de um manipulador em certa configuração para gerar velocidades no efetuador final. O índice de desempenho é proporcional a volume do elipsoide de velocidade. No caso geral a manipulação está definida da seguinte forma:

$$w = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (2.17)$$

nos manipuladores não redundantes $w = |\det(J)|$. A manipulação é semelhante a produto dos valores singulares: $w = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$. Quando o manipulador apresenta maiores valores de manipulação é porque tem maior capacidade de movimentos em certas direções. No caso que a manipulação seja igual à zero é porque o manipulador se encontra numa configuração singular, perdendo a capacidade de realizar movimentos em certas direções Moreno et al. (2012). Além disso, Yoshikawa (1985) apresentou o conceito de manipulação de força. Este índice tem como objetivo em medir a capacidade de força no efetuador final do manipulador para uma configuração dada. Para gerar o elipsoide de força é usado o modelo estático da equação (2.8), onde f é o conjunto de forças obtidas pelos atuadores τ , de tal forma que: $\|\tau\| \leq 1$ forma um elipsoide no espaço euclidiano m dimensional, dado por:

$$f^T J J^T f \leq 1 \quad (2.18)$$

O volume da força é inversamente proporcional à manipulação de velocidade. De tal forma que a manipulação de força é:

$$w_f = \frac{1}{\sqrt{\det(JJ^T)}} \quad (2.19)$$

os eixos principais do elipsoide de força estão definidos como:

$u_1/\sigma_1, u_2/\sigma_2, \dots, u_n/\sigma_m$. Isto significa a direção onde o efetuador final pode exercer a maior força com menor velocidade.

O índice de manipulação é usado frequentemente na planificação de trajetórias em manipuladores seriais redundantes (UEBERLE; MOCK; BUSS, 2004; LI; SASTRY, 1988). Além disso, o índice de manipulação é generalizado para arquiteturas mecânicas, tais como a cadeia cinemática fechada (PARK; KIM, 1998), também é usado em várias cadeias seriais cooperativas (BICCHI; MELCHIORRI; BALLUCHI, 1995).

2.1.2 Abordagem clássica da isotropia

2.1.2.1 Robô isotrópico

No projeto de mãos robóticas com cinemática serial apresentada por Salisbury e Craig (1982), foi introduzido pela primeira vez o conceito do robô isotrópico. Um robô é chamado isotrópico se pelo menos em um ponto do espaço de trabalho algumas de suas propriedades cinestostáticas são homogêneas em relação a todas as direções. Essas propriedades podem ser pesquisadas por meio dos elipsoides de manipulabilidade (YOSHIKAWA, 1990). O principal impulso sobre a isotropia e manipuladores isotrópicos foi dado por Angeles e López-Cajún (1992), eles definem o manipulador serial não redundante como isotrópico quando sua matriz jacobiana satisfaz a seguinte relação:

$$J^T J = \lambda I_{6 \times 6} \quad (2.20)$$

onde λ é um escalar e $I_{6 \times 6}$ é a matriz identidade. No entanto, para dar significado a esta condição, é essencial normalizar as unidades dividindo todos os comprimentos do manipulador por um fator de escala adequado obtendo os comprimentos característicos. O problema é que nem sempre é claro qual comprimento característico deve ser selecionado. Uma metodologia foi apresentada por Fassi, Legnani e Tosi (2005) para avaliar automaticamente o comprimento característico. Soluções alternativas podem ser obtidas pelo estudo do movimento tridimensional do corpo rígido (ANGELES, 2006).

2.1.2.2 Propriedades cinestostáticas

Fassi, Legnani e Tosi (2005), estudam as propriedades cinestostáticas de um manipulador serial ou paralelo em termos de velocidade, força, rigidez e movimento através das seguintes relações:

$$\dot{Q} = J\dot{S} \quad F_s = J^T F_q \quad J = \frac{\partial Q}{\partial S} \quad (2.21)$$

onde J é a matriz jacobiana que relaciona a velocidade do efetuador final \dot{S} com as dos atuadores \dot{Q} , F_q são as forças ou torques exercidas pelos atuadores e F_s são as forças e torques aplicados pelo efetuador final.

2.1.2.3 Velocidade isotrópica

Segundo Fassi, Legnani e Tosi (2005), um manipulador é isotrópico em relação à velocidade, se ele pode executar a mesma velocidade em todas as direções. Esta propriedade pode ser procurada por meio do elipsóide de velocidade (YOSHIKAWA, 1990).

Um elipsoide de velocidade é definido imaginando que o movimento do manipulador restringe a velocidade de tal forma que:

$$\dot{Q}^T \dot{Q} = 1 \quad (2.22)$$

substituindo a relação da equação (2.10) na equação (2.11), obtemos a seguinte equação:

$$J^T \dot{S}^T J \dot{S} = 1 \quad (2.23)$$

A equação (2.23), define um elipsóide velocidade no ponto central do efetuador final o qual descreve a capacidade do manipulador para gerar velocidade nas diferentes direções (LEGNANI et al., 2010).

2.1.2.4 Força isotrópica

De acordo com Fassi, Legnani e Tosi (2005), um manipulador é isotrópico em relação à força, se ele pode exercer a mesma força ao longo de todas as direções. Esta propriedade pode ser procurada por meio do elipsoide de força:

$$F_q^T F_q = F_s^T (J^{-1} J^{-T}) F_s = 1 \Rightarrow F_s^T (J^T J)^{-1} F_s = 1 \quad (2.24)$$

O elipsóide de força está associado aos autovetores e autovalores de $(J^T J)^{-1}$. Comparando as equações (2.23) e (2.24), é possível concluir que o elipsoide de força e velocidade são recíprocos entre si, de forma que os autovalores de qualquer matriz A coincidem com seu inverso A^{-1} e que os autovetores sempre são os mesmos. Assim, as direções da velocidade máxima disponível coincidem com as da força mínima disponível. De tal forma que os volumes dos elipsóides de força e velocidade também são recíprocos entre si (LEGNANI et al., 2010).

2.1.2.5 Repetibilidade isotrópica

Um manipulador é isotrópico com respeito à repetibilidade, se a região de incerteza da posição do ponto central do efetuador final através do movimento dos atuadores é uma esfera. Isto é analisado por meio do elipsóide de repetibilidade. A repetibilidade isotrópica é representada por um elipsoide de velocidade, de fato a equação que descreve o movimento infinitesimal é semelhante:

$$\frac{dQ}{dt} = J \frac{dS}{dt} \Rightarrow dQ = J dS \Rightarrow dS^T J^T J dS = 1 \quad (2.25)$$

2.1.2.6 Massa isotrópica

Um manipulador é isotrópico em relação à massa, se a aceleração do ponto central do efetuador final é produzida por uma força unitária na direção da força e sua magnitude é independente da direção da força. Isto é analisado por meio do elipsóide de massa.

De tal forma que as forças de acionamento ou torques necessários para accionar um manipulador podem ser expressas como:

$$F_q = M\ddot{Q} + V(Q, \dot{Q}) \quad (2.26)$$

onde $M = M(Q)$ é a matriz quadrática da massa e V é um vetor que depende das massas e do movimento. Lembrando as relações da equação (2.10) para uma velocidade pequena, é possível relacionar uma força com uma aceleração no efetuador final como:

$$F_s = J^T M J \ddot{S} \Rightarrow F_s = \bar{M} \ddot{S} \quad (2.27)$$

onde uma elipse pode ser associada à matriz $\bar{M} = J^T M J$ para representar a força necessária para produzir uma aceleração unitária do efetuador final. No caso de isotropia, uma força produz uma aceleração pura e um torque produz uma aceleração angular pura. A aceleração do efetuador final é paralela à força e sua magnitude é independente de sua direção. O mesmo acontece com torque e aceleração angular. Isso acontece quando:

$$\bar{M} = \text{diag}(m, m, m, J_g, J_g, J_g) \quad (2.28)$$

onde m é uma massa equivalente e J_g é um momento de inércia equi-

valente.

2.1.2.7 Rigidez isotrópica

Como definido por Fassi, Legnani e Tosi (2005), um manipulador é isotrópico em relação à rigidez, se a deflexão do ponto central do efetuador final é produzida por uma força unitária na direção da força e sua magnitude é independente da direção da força.

Uma análise foi desenvolvida por Fassi, Legnani e Tosi (2005), assumindo que os atuadores estão bloqueados e que somente são fontes de conformidade, de tal forma que a força F_s a ser aplicada ao efetuador final para produzir um movimento dS é:

$$F_s = J^T K_q J dS \quad K_q = \text{diag}(\dots, k_i, \dots) \quad (2.29)$$

onde k_i é a rigidez do atuador i .

De tal forma que a conformidade do manipulador é sinteticamente representada pela matriz de rigidez K_s :

$$K_s = J^T K_q J \quad (2.30)$$

Um manipulador geral de 6 DOF é isotrópico em relação à rigidez, se K_s tem a seguinte estrutura diagonal:

$$K_s = \text{diag}(k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}, k_{\alpha\alpha}, k_{\beta\beta}, k_{\gamma\gamma}) \quad (2.31)$$

por meio de: $k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k_x$ e $k_{\alpha\alpha} = k_{\beta\beta} = k_{\gamma\gamma} = k_\phi$, os resultados para este caso são:

$$F = k_x dX \quad T = k_\phi d\Phi \quad (2.32)$$

onde k_x é translação da rigidez e k_ϕ é a rotação da rigidez, isso significa que:

- Os torques aplicados no ponto central do efetuador final não produzem translações dX , somente rotações $d\Phi$.
- As forças aplicadas no ponto central do efetuador final não produzem rotações $d\Phi$, somente translações dX .
- A rotação é proporcional ao torque, e ocorre em torno de mesmo

eixo do torque aplicado.

- A translação é proporcional à força e paralela a ela, independentemente da direção da força.

De acordo a equação (2.9), o manipulador é isotrópico em relação à rigidez se existe um escalar λ para o qual cumpra a seguinte condição:

$$\text{cond}(K_L K_S K_L) = 1 \quad K_L = \text{diag}(1, 1, 1, 1/\lambda, 1/\lambda, 1/\lambda) \quad (2.33)$$

De tal forma que K_S tem a estrutura da equação (2.31) e $\lambda = \sqrt{k_\phi/k_x}$. Se o manipulador apresenta um caso especial onde todos os atuadores sejam idênticos, portanto eles têm a mesma rigidez k , a equação (2.30) pode ser simplificada como $K_s = kJ^T J$ e o número condicional da matriz $J^T J$ pode ser procurada em lugar de $J^T K_q J$. Neste caso a isotropia para velocidade, força e rigidez são temporalmente alcançados quando a condição da equação (2.9) seja satisfeita. Com referencia a equação (2.31), um manipulador é parcialmente isotrópico se $k_{xx} = k_{yy} \neq k_{zz}$ e/ou $k_{\alpha\alpha} = k_{\beta\beta} \neq k_{\gamma\gamma}$. O conceito de isotropia pode ser útil no projeto de manipuladores quando uma rigidez diferente é necessária para uma determinada direção.

2.2 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se uma breve revisão sobre a capacidade de força e os diversos índices de desempenho cinestoe estáticos que podem ser utilizados no projeto de manipuladores seriais. Novos conceitos sobre a isotropia em manipuladores seriais foram apresentados, surgindo o conceito de força isotrópica, o qual é o ponto central deste trabalho.

3 CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA EM MANIPULADORES USANDO O MÉTODO DE FATOR DE ESCALA MODIFICADO

Neste Capítulo é apresentado o desenvolvimento do método proposto para obtenção da máxima força isotrópica em manipuladores seriais planares. Este método foi baseado no método de fator de escala clássico apresentado por Nokleby et al. (2005) e no método de fator de escala modificado apresentado por Mejia et al. (2015). Estes dois procedimentos foram estudados para desenvolver o modelo matemático que determina a máxima força isotrópica nos manipuladores seriais planares. A vantagem do fator de escala modificado é que determina a máxima força evitando o uso de algoritmos de otimização para um momento determinado. Além disso, ele pode ser usado em aplicações de tempo real, pela rapidez de processamento para resolver o problema da capacidade de força (MEJIA et al., 2015). Por outro lado, o método clássico não permite que um momento determinado seja incluído na análise, necessitando de algoritmos de otimização para resolver o problema da capacidade de força, aumentando significativamente o tempo de resposta. Estes dois procedimentos são apresentadas neste trabalho.

3.1 MÉTODO DO FATOR DE ESCALA CLÁSSICO

O método do fator de escala clássico, apresentado por Nokleby et al. (2005), consiste em aplicar uma ação unitária na direção desejada e determinar a junta do manipulador que está relativamente mais carregada (WEIHMANN et al., 2011b). Este método permite incluir os limites dos atuadores para determinar a capacidade de força-momento no efetuador final. No método de fator de escala clássico, um helicoide de força $\$F$ é usado para representar a direção da força desejada, como mostra na equação (3.1). Nesta equação f_{app} é a intensidade da heliforça $\$F_{app}$ (NOKLEBY et al., 2005).

$$\$F_{app} = f_{app}\$F \quad (3.1)$$

A heliforça do efetuador final $\$F_{app}$, pode ser determinado através de uma heliforça $\$F = \{f^T; m^T\}$, sendo f^T as forças em f_x, f_y e f_z e m^T os momentos em m_x, m_y e m_z .

Para melhor entendimento do método, considere uma heliforça

unitária com momento igual a zero, como se apresenta na Figura 2.

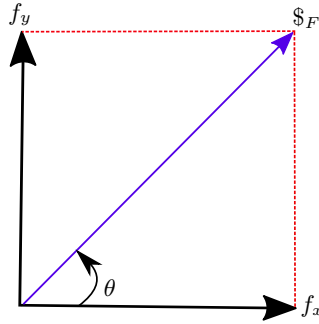


Figura 2 – Força desejada em um caso planar.

onde $\$F = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ e θ é o ângulo da direção da força $\$F$. Decompondo $\$F$ em função do ângulo e reescrevendo a equação (3.1), tem-se a equação (3.2):

$$\$F = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) na equação (2.8), pode-se obter os valores dos torques com a matriz jacobiana em função da força unitária, como se apresenta na equação (3.3)

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ao expandir a equação (3.3), os torques podem ser calculados na direção desejada, pela equação seguinte:

$$\tau_i(\theta) = a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta) + a_{i,3} 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

Identificando os limites máximos dos torques para aplicar ou suportar uma força ou ação unitária, pode-se determinar os fatores de escala para cada junta atuada do manipulador pela equação (3.5)

$$\psi_i = \left| \frac{\tau_{imax}}{\tau_i(\theta)} \right| \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

onde ψ_i representa o fator de escala para cada junta atuada i e $\tau_i(\theta)$ é o torque para cada junta atuada i para uma força unitária na direção desejada, obtido a partir da equação (3.4). O fator de escala máximo Ψ da equação (3.6), é o valor mínimo do conjunto de fatores de escala. Indicando o valor máximo de força que todos os torques podem alcançar sem ultrapassar os limites correspondentes.

$$\Psi = \min(\psi_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

Como $\$F = [\cos(\theta), \sin(\theta), 0]^T$ é uma unidade de força com um momento determinado igual a zero ($m_z = 0$), o método corresponde a uma força pura, o que nos permite reescrever a equação (3.1) como:

$$F_m = f_m \$F \quad (3.7)$$

onde f_m é a intensidade da força de F_m , e seu máximo valor possível é:

$$f_m = \Psi \quad (3.8)$$

Multiplicando ambos lados da equação de estática apresentada pelo fator de escala Ψ , é possível verificar a influência do fator de escala de forma mais clara na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Psi \tau_1(\theta) \\ \Psi \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \Psi \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi \cos(\theta) \\ \Psi \sin(\theta) \\ \Psi 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Na equação (3.9), pode-se observar que o uso do fator de escala, implica que os torques do manipulador serão escalados pelo valor de Ψ , e a força unitária será dimensionada também para o mesmo valor de Ψ , mas o momento do manipulador permanece igual a zero. Os efeitos do processo de escalonamento em uma força unitária podem ser visto na Figura (3)

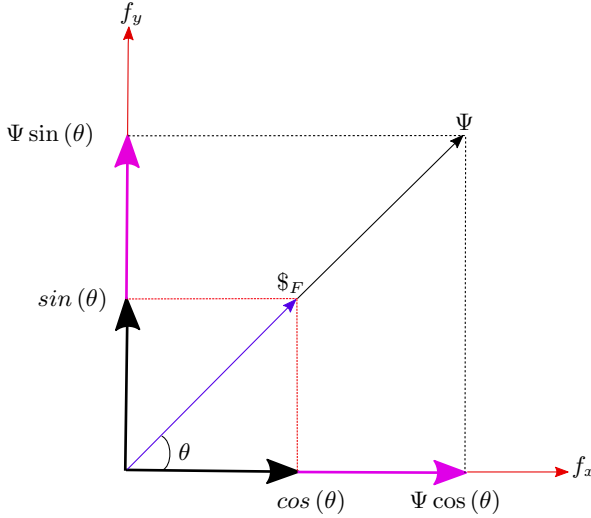


Figura 3 – Efeitos de multiplicar uma força pura pelo fator de escala.

3.2 MÉTODO DO FATOR DE ESCALA MODIFICADO

É importante destacar que no método de fator de escala clássico, quando um momento é diferente de zero ($m_z \neq 0$) e é multiplicado pelo valor de Ψ , resulta uma alteração no momento desejado. Por exemplo, supondo que a heliforça da equação (3.7) seja $\$F = [\cos(\theta), \sin(\theta), m_z]^T$ e multiplicando pelo fator de escala Ψ , a equação 3.9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi \tau_1(\theta) \\ \Psi \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \Psi \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi \cos(\theta) \\ \Psi \sin(\theta) \\ \Psi m_z \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Pode-se observar na equação (3.10) que, se o momento determinado é diferente de zero ($m_z \neq 0$), ele será dimensionado Ψ vezes, em conjunto com a força unitária, sendo uma situação indesejável, já que o valor final para o momento é Ψ vezes maior do que o valor desejado.

Para solucionar este problema, o método clássico usa um algo-

ritmo de otimização Quase-Newton, chamado BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Este algoritmo aumenta significativamente o tempo necessário para resolver o problema da capacidade de força. Mejia et al. (2015) apresentaram o fator de escala modificado, que resolve o problema, sem o uso de algoritmos de otimização, de forma mais rápida e direta. Para este método, basta encontrar um valor inicial para o momento (m_z), que satisfaça a seguinte condição:

$$m_z = \psi_i \mu \quad (3.11)$$

onde μ é o valor inicial do momento que multiplicado por o conjunto de fatores de escala ψ_i resulta o momento desejado m_z .

Desta forma a equação (3.9), pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \tau_1(\theta) \\ \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \mu \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Ao expandir a equação (3.12), a equação (3.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tau_i(\theta, \mu) = a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta) + a_{i,3} \mu \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

Considerando a direção θ como uma constante, a equação (3.13) pode ser reescrita de uma forma simplificada como uma função única de μ , como se apresenta na equação (3.14):

$$\tau_i(\mu) = m_i(\theta) + a_{i,3} \mu \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

onde

$$m_i(\theta) = a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta) \quad (3.15)$$

Da mesma forma que na equação 3.5, os limites máximos dos torques atuados para aplicar ou suportar uma força ou ação unitária são conhecidos, podendo determinar os fatores de escala para cada junta atuada do manipulador pela seguinte equação:

$$\psi_i(\mu) = \left| \frac{\tau_{i_{max}}}{\tau_i(\mu)} \right| = \left| \frac{\tau_{i_{max}}}{m_i(\theta) + a_{i,3} \mu} \right| \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

Como o conjunto de fatores de escala $\psi_i(\mu)$, depende do valor de μ , a equação (3.11) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$m_z^2 = (\psi_i(\mu) \mu)^2 \quad (3.17)$$

Substituindo a equação (3.17) na equação (3.16) e utilizado a propriedade do valor absoluto $|f|^2 = f^2$, obtemos a seguinte equação:

$$m_z^2 = \left(\frac{\tau_{i_{max}}}{m_i(\theta) + a_{i,3}\mu} \right)^2 \mu^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.18)$$

Esta nova equação é uma equação quadrática, cuja solução nos permite determinar os valores de μ que satisfazem as equações (3.11) e (3.16), podendo ser algebricamente manipulada para obter os valores das raízes de μ , como se apresenta na equação abaixo:

$$A\mu^2 + B\mu + C = 0 \quad (3.19)$$

onde

$$A = (m_z a_{i,3})^2 - \tau_{i_{max}}^2 \quad (3.20)$$

$$B = 2m_z^2 a_{i,3} m_i(\theta) \quad (3.21)$$

$$C = (m_z m_i(\theta))^2 \quad (3.22)$$

A solução da equação quadrática (3.19), apresenta duas raízes distintas, retornando dois valores de μ para cada junta atuada i . As raízes obtidas devem ser usadas na equação (3.16), a fim de obter os fatores de escala, um fator de escala para cada raiz μ obtida. Como no método clássico, o fator de escala máximo é o valor mínimo do conjunto de fatores de escala ψ_i , isto é:

$$\Psi = \min \{ \psi_i(\mu_1), \psi_i(\mu_2) \} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.23)$$

onde μ_1 e μ_2 são as duas raízes de μ , obtidos para cada valor de $i = 1, 2, \dots, n$. Uma vez que $\$F = [\cos(\theta), \sin(\theta), \mu]^T$ representa uma unidade de força com um momento inicial em z , a máxima intensidade de força f_{app} possível de uma heliforça F_{app} é:

$$f_{app} = \Psi \quad (3.24)$$

Multiplicando ambos lados da equação de estática pelo fator de

escala Ψ , a equação (3.12) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi \tau_1(\theta) \\ \Psi \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \Psi \cdot \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi \cos(\theta) \\ \Psi \sin(\theta) \\ \Psi \mu \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Na equação (3.25), o primeiro elemento do vetor à direita representa a força máxima do efetuator final no eixo x , isto é, $F_x = \Psi \cos(\theta)$. O segundo elemento do vetor à direita, representa a força máxima do efetuator final no plano y , isto é, $F_y = \Psi \sin(\theta)$. O último elemento do vetor direito, representa o momento desejado no efetuator final, isto é, $m_z = \Psi \mu$, como mostrado anteriormente na equação (3.11). Neste ponto, é importante ressaltar que o método do fator de escala modificado resolve o principal problema associado com o método do fator de escala clássico, evitando o uso de algoritmos de otimização e permitindo incluir o momento desejado do efetuator final na análise da capacidade de força do manipulador.

3.2.1 Momento máximo imposto

O método do fator de escala proposto por Mejia et al. (2015), permite a imposição de um momento desejado no efetuator final do manipulador (m_z). Este momento imposto não pode ter valores fora da faixa aceitável, isto é, $m_{z_{min}} \leq m_z \leq m_{z_{max}}$. O cálculo de $m_{z_{min}}$ e $m_{z_{max}}$ pode ser obtido seguindo a mesma lógica do fator de escala modificado, mas agora um momento unitário é imposto ($m_z = 1$) sem força em x e sem força em y , ou seja, um momento puro. A fim de calcular o máximo momento permitido, uma nova heliforça é imposta como $\$F = [0, 0, 1]^T$, onde a equação (3.12) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \tau_1(\theta) \\ \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Expandindo a equação (3.26), obtém-se os valores de τ_1, \dots, τ_n . A expansão da equação (3.26) é mostrada na equação 3.27.

$$\tau_i(\theta) = a_{i,3} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.27)$$

Conhecendo os limites máximos dos torques para cada junta atuada, o conjunto de fatores de escala pode ser encontrado usando a equação (3.5), isto é:

$$\psi_i = \left| \frac{\tau_{i_{max}}}{\tau_i(\theta)} \right| \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.28)$$

onde ψ_i representa o fator de escala para cada junta atuada i para uma força unitária na direção desejada, $\tau_{i_{max}}$ é o limite máximo dos torques atuados conhecidos e $\tau_i(\theta)$ é o torque da junta atuada i por uma unidade de força na direção desejada, obtida na equação (3.27). O fator escala máximo Ψ da equação 3.28, é o valor mínimo do conjunto de fatores de escala, indicando o valor máximo de força que todos os torques atuados podem alcançar sem ultrapassar os limites correspondentes, isto é:

$$\Psi = \min(\psi_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.29)$$

já que $\$F = [0, 0, 1]^T$, é uma heliforça com um momento unitário em z , o máximo momento possível $m_{z_{max}}$ do helicóide é:

$$m_{z_{max}} = \Psi \quad (3.30)$$

Multiplicando o fator de escala em ambos lados da equação de estática (3.26), a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi \tau_1(\theta) \\ \Psi \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \Psi \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi 0 \\ \Psi 0 \\ \Psi 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Se o procedimento é repetido com uma heliforça $\$F = [0, 0, -1]^T$, é possível obter o momento mínimo no efetuador final do manipulador. Como $m_{z_{min}} = -m_{z_{max}}$. Pode-se construir uma faixa aceitável dos momentos impostos tal que $[m_{z_{min}} \leq m_z \leq m_{z_{max}}]$.

3.3 MÁXIMA CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA

A máxima capacidade de força isotrópica (F_{iso}), corresponde, geometricamente, ao raio do círculo inscrito no polígono apresentado na Figura 7 da página 65. Outra forma de visualizar este conceito pode ser como a mínima distância entre a origem do sistema de referência e

as arestas do polígono. A força isotrópica determina a máxima força que o efetuator final podem aplicar ou suportar em toda as direções.

Utilizando novamente o principio do fator de escala modificado, é possível determinar a máxima força isotrópica, partindo do modelo estático de forma mais rápida e direta e sem utilização de algoritmos de otimização. Como se apresenta a seguir:

$$\begin{bmatrix} \tau_1(\theta) \\ \tau_2(\theta) \\ \vdots \\ \tau_n(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \mu \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

A equação (3.32) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tau_i = a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta) + a_{i,3} \mu \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.33)$$

multiplicando ambos lados da equação (3.33) pelo conjunto de fatores de escala ψ_i , a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\psi_i \tau_i = a_{i,1} \cos(\theta) \psi_i + a_{i,2} \sin(\theta) \psi_i + a_{i,3} \mu \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.34)$$

Assumindo que existe um fator de escala no conjunto de fatores de escala ψ_i , que satura a junta τ_i , podemos assumir as seguintes condições.

$$\psi_i \tau_i = \tau_{i_{max}} \quad (3.35)$$

$$\psi_i \mu = m_z \quad (3.36)$$

isolando o termo μ da equação (3.36), obtemos a seguinte equação:

$$\mu = \frac{m_z}{\psi_i} \quad (3.37)$$

substituindo as equações (3.35) e (3.37) em (3.34), obtemos a seguinte equação:

$$\tau_{i_{max}} = [a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta)] \psi_i + a_{i,3} \frac{m_z}{\psi_i} \psi_i \quad (3.38)$$

isolando os fatores de escala ψ_i da equação (3.38), como uma função de θ , tem-se:

$$\psi_i = \frac{\tau_{imax} - a_{i,3}m_z}{a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta)} \quad (3.39)$$

Na equação (3.39), observar-se que o numerador é constante e que o denominador depende de θ . Assim, se for possível minimizar o denominador, pode-se maximizar o conjunto de fatores de escala ψ_i .

Analisando o denominador da equação (3.39), tem-se:

$$D \rightarrow a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta) \quad (3.40)$$

derivando a equação (3.40) e igualando-a zero, obtém-se a seguinte equação:

$$D' \rightarrow -a_{i,1} \sin(\theta) + a_{i,2} \cos(\theta) = 0 \quad (3.41)$$

dividindo ambos lados da equação (3.41) por $\cos(\theta)$, a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$D' \rightarrow -a_{i,1} \tan(\theta) + a_{i,2} = 0 \quad (3.42)$$

isolando o θ da equação (3.42), obtém-se os ângulos críticos:

$$\theta_{crit} = \tan^{-1} \left(\frac{a_{i,2}}{a_{i,1}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.43)$$

substituindo a equação (3.43) na equação (3.39) e aplicando as propriedades trigonométricas seguintes:

$$\cos(\tan^{-1}(x)) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \quad \sin(\tan^{-1}(x)) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \quad (3.44)$$

A equação (3.39) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Psi_i = \frac{\tau_{imax} - a_{i3}m_z}{\frac{a_{i1}}{\sqrt{1+x^2}} + \frac{a_{i2}x}{\sqrt{1+x^2}}} \quad (3.45)$$

fazendo um desenvolvimento matemático na equação (3.45), obtemos o seguinte:

$$\Psi_i = \frac{(\tau_{imax} - a_{i3}m_z) \sqrt{1+x^2}}{a_{i1} + a_{i2}x} \quad (3.46)$$

Sabemos que $x = a_{i2}/a_{i1}$, de tal forma que a equação (3.46) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Psi_i = \frac{(\tau_{imax} - a_{i3}m_z) \sqrt{1 + \frac{a_{i2}^2}{a_{i1}^2}}}{a_{i1} + a_{i2} \frac{a_{i2}}{a_{i1}}} \quad (3.47)$$

desenvolvendo a equação (3.47), obtemos o seguinte:

$$\Psi_i = \frac{(\tau_{imax} - a_{i3}m_z) \left(\sqrt{a_{i1}^2 + a_{i2}^2} \right)}{a_{i1}^2 + a_{i2}^2} \quad (3.48)$$

elevando ao quadrado em ambos lados da equação (3.48), a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Psi_i^2 = \frac{(\tau_{imax} - a_{i3}m_z)^2}{(a_{i1}^2 + a_{i2}^2)} \quad (3.49)$$

eliminando o quadrado em ambos lados da equação (3.49), obtemos a seguinte equação:

$$\psi_i = \frac{\tau_{imax} - a_{i,3}m_z}{\sqrt{a_{i,1}^2 + a_{i,2}^2}} \quad (3.50)$$

Desta forma obtém-se o conjunto de fatores de escala ψ_i em função dos parâmetros $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ e $a_{i,3}$ do modelo estático da equação (3.32). Onde a força isotrópica é o valor mínimo do conjunto de fatores de escala ψ_i , isto é apresentado na equação (3.51).

$$F_{iso} = \min(\psi_i) \quad (3.51)$$

Este é o principal resultado obtido na presente dissertação, e constitui um importante avanço no estudo da capacidade de força, pois é a primeira vez que é desenvolvido um método para determinar a capacidade de força isotrópica. Além disso, o método proposto permite obter a capacidade de força isotrópica de forma rápida e direta, sem o uso de algoritmos de otimização.

Outra vantagem deste método é que identificando os torques máximos do manipulador e escolhendo o momento desejado no efetuador final é possível determinar a força isotrópica sem calcular as forças em todas as direções, reduzindo o tempo de execução no algoritmo 1 apresentado na página 67, permitindo calcular as forças isotrópicas em todo o espaço de trabalho do manipulador de uma forma mais eficiente.

A tabela 1 apresenta um comparativo entre o método proposto, o de fator de escala modificado e o de fator de escala clássico, para que o leitor conheça as características de cada um deles e as vantagens do método proposto.

Tabela 1 – Comparativo entre os métodos apresentados para a otimização da capacidade de força-momento de manipuladores.

Caraterísticas	Método Clássico	Método Modificado	Método Proposto
Diferentes ações de contato presentes	sim	sim	sim
Diferentes modo de trabalho	não	sim	sim
Posição do EF variável	não	sim	sim
Direção de aplicação de força variável	não	sim	sim
Geração de trajetória de força	não	sim	sim
Otimização da topologia do manipulador	não	sim	sim
Otimização da força isotrópica	não	não	sim

O método de otimização da capacidade de força proposta é validada através de quatro casos de estudos. O primeiro é um manipulador planar serial de tipo $3R$, o segundo é um manipulador redundante planar serial de tipo $4R$, o terceiro é um manipulador redundante planar serial de tipo $5R$ e o quarto é um manipulador redundante planar serial de tipo $6R$. Os resultados do primeiro caso são apresentados neste capítulo, os resultados para os demais casos podem ser consultados no capítulo 6.

4 MAPAS DE FORÇA ISOTRÓPICA DO ROBÔ 3R

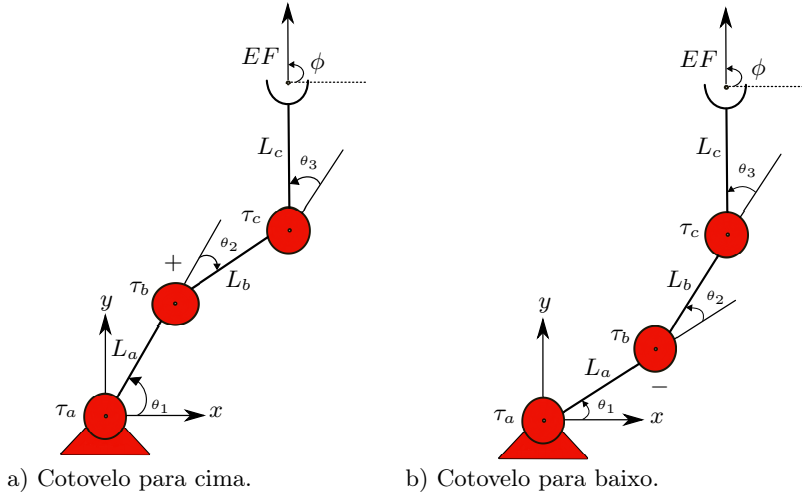


Figura 4 – Manipulador serial planar tipo 3R.

O manipulador serial planar possui três juntas rotativas ($R = 3$) e sua mobilidade é ($M = 3$). O mecanismo não possui forças no eixo Z e não possui momentos nos eixos X e Y . O desenvolvimento da estática do manipulador foi resolvida usando o método de Davies (1983). A solução da estática para este manipulador pode ser generalizada como se apresenta na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \\ \tau_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(EF) \\ F_y(EF) \\ m_z(EF) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Os valores utilizados no manipulador serial 3R, foram escolhidos aleatoriamente para o estudo da capacidade de força. Os resultados obtidos neste capítulo foram desenvolvidos com os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do manipulador planar serial de 3R.

Parâmetros do manipulador 3R	Valor
Comprimento L_a	3 m
Comprimento L_b	2 m
Comprimento L_c	1 m
Torque Máximo τ_a	± 30 N m
Torque Máximo τ_b	± 20 N m
Torque Máximo τ_c	± 10 N m
Ângulo θ_1	90°
Ângulo θ_2	-90°
Ângulo θ_3	0°
Orientação do efetuador final ϕ	Valor
Mapa da Figura 9	0^0
Mapa da Figura 10	45^0
Mapa da Figura 11	90^0
Mapa da Figura 12	180^0
Mapa da Figura 13	270^0

4.0.1 Máxima capacidade de força com $m_z = 0$

A máxima capacidade de força do efetuador final foi obtida usando o método do fator de escala modificado, considerando o momento determinado igual a zero ($m_z = 0$). Além disso, a máxima força está em função da direção do ângulo θ , podendo variar no intervalo $[0^0, 360^0]$. Dessa forma, pode-se obter o polígono da capacidade de força, como se apresenta na figura 5. A partir dessa figura, nota-se que a magnitude da força F_m , varia uma vez que muda de direção. A maior distância a partir do centro do espaço de força do polígono é considerada a máxima força que o efetuador final pode aplicar ou suportar. Esta força pode ser aplicada apenas em uma direção particular, e corresponde a um vértice do polígono.

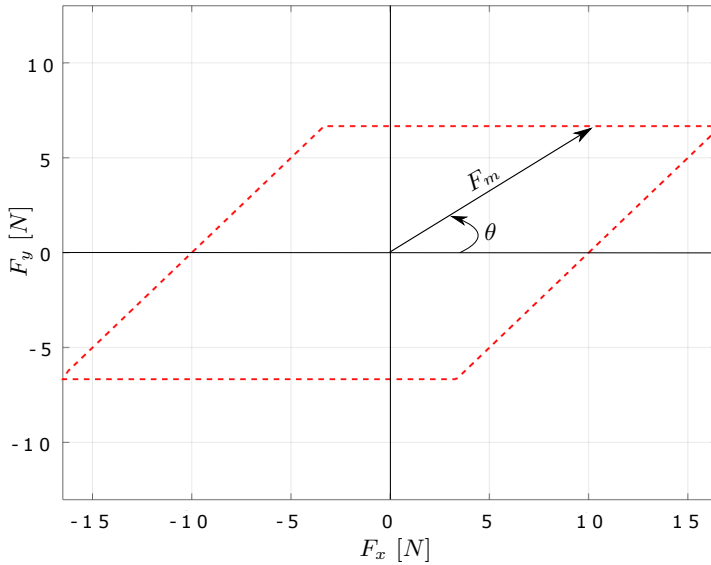
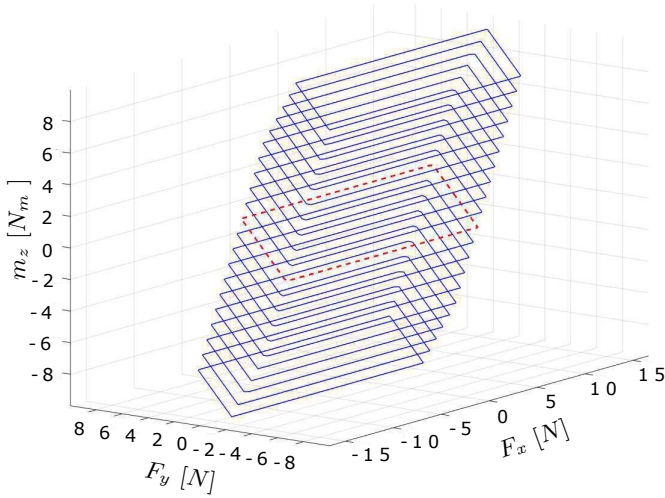


Figura 5 – Polígono da capacidade de força para o manipulador 3R.

4.0.2 Máxima capacidade de força com $m_z \neq 0$

A máxima capacidade de força do efetuator final, com o momento diferente de zero ($m_z \neq 0$), foi obtido usando o fator de escala modificado variando o momento no intervalo do momento máximo imposto apresentado na seção 3.2.1. O intervalo máximo obtido foi $[-m_{z_{min}}; m_{z_{max}}] = [-10 \text{ Nm}; 10 \text{ Nm}]$. Para cada valor do momento m_z , obtemos um polígono de força, formando um politopo da capacidade de força em função do momento m_z apresentado na Figura 6. Note que o polígono de linha tracejada possui momento igual a zero, sendo o mesmo polígono apresentado na Figura 5.



linha tracejada vermelha $m_z = 0$
 linha cheia azul $m_z \neq 0$

Figura 6 – Polítopo da capacidade de força para o manipulador 3R.

4.0.3 Máxima capacidade de força isotrópica com $m_z = 0$

A máxima capacidade de força isotrópica do efetuador final foi obtida usando o método do fator de escala modificado apresentado na seção 3.3, com o momento igual a zero ($m_z = 0$). Para este caso, a equação (3.39) pode ser reescrita como:

$$\psi_i = \frac{\tau_{i_{max}}}{a_{i,1} \cos(\theta) + a_{i,2} \sin(\theta)} \quad (4.2)$$

obtendo o conjunto de fatores de escala ψ_i , onde a máxima força isotrópica é o valor mínimo do conjunto de fatores de escala, como apresentado na equação (3.44). Além disso, a máxima força isotrópica é dada em função da direção do ângulo θ , variando uma vez mais o ângulo no intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$. Assim, obtém-se a circunferência da máxima força isotrópica, conforme Figura 7. Nota-se que a máxima força isotrópica disponível, F_{iso} , é a distância mais curta entre o centro do espaço de força do polígono, sendo de igual magnitude em todas as direções de θ .

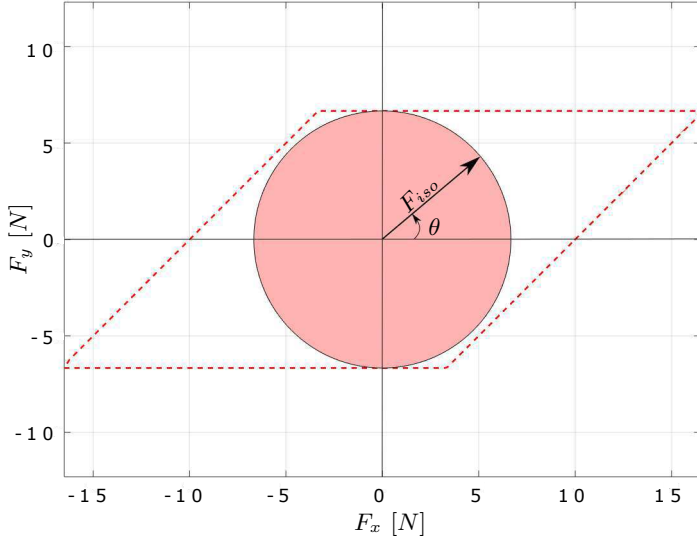
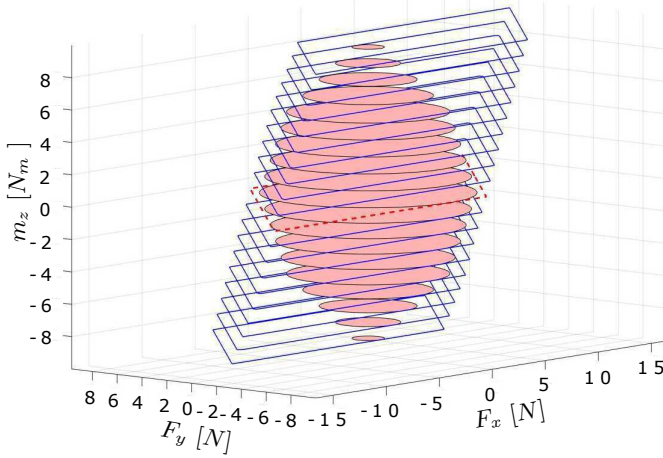


Figura 7 – Circunferência da máxima força isotrópica para o manipulador 3R.

4.0.4 Máxima capacidade de força isotrópica com $m_z \neq 0$

A máxima capacidade de força isotrópica do efetuator final, com o momento prescrito diferente de zero ($m_z \neq 0$), foi obtida com o fator de escala modificado, variando o momento no intervalo do momento máximo imposto, conforme apresentado na seção 3.2.1. O intervalo máximo obtido para este mecanismo foi $[-m_{z_{min}}; m_{z_{max}}] = [-10 \text{ N m}; 10 \text{ N m}]$. Para cada valor do momento m_z , obtém-se uma circunferência da máxima força isotrópica de raio F_{iso} , formando um cone duplo da máxima força isotrópica em função do momento m_z , conforme Figura 8. Note que o polígono de linha tracejada com momento igual a zero é o mesmo polígono apresentado na Figura 7.



linha tracejada vermelha $m_z = 0$
 linha cheia azul $m_z \neq 0$

Figura 8 – Cone duplo da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$.

4.0.5 Geração dos mapas das forças isotrópicas

Os mapas da força isotrópica são obtidos para todo o espaço de trabalho do manipulador para uma determinada orientação do efetuador final no plano xy , onde a força isotrópica é calculada para cada ponto dentro desse espaço de trabalho, considerando uma malha de 0.1 m. Este cálculo foi desenvolvido para uma malha de 14.000 pontos com o momento igual a zero $m_z = 0$, desta forma o valor da força isotrópica F_{iso} não é afetada pela presença do momento. A maior força isotrópica é apresentada no polígono de linha tracejada da Figura 8, as demais forças isotrópicas apresentadas na mesma figura, são afetadas pela presença do momento. Para cada ponto avaliado dentro do espaço do trabalho do manipulador com uma determinada orientação do efetuador final, obtém-se um valor de força isotrópica, formando o mapa de forças isotrópicas. O procedimento para a obtenção do mapa das maiores forças isotrópicas para o robô planar $3R$ é mostrado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Algoritmo para obter o mapa das forças isotrópicas para um manipulador serial planar 3R.

Entrada:

Define-se os valores dos elos L_a, L_b, L_c ;

Define-se os valores dos torques máximos $\tau_{amax}, \tau_{bmax}, \tau_{cmax}$;

Define-se a orientação do efetuador final θ ;

Define-se o modo de trabalho M_d ;

Saída: $Mapa_Iso$

1: $Comp = L_a + L_b + L_c$;

2: **Para** $y = -Comp$ **até** $Comp$ **faça**

3: **Para** $x = -Comp$ **até** $Comp$ **faça**

4: $Cin_Inv_3R(L_a, L_b, L_c, \theta, x, y, M_d)$;

5: **Se** $(Cin_Inv_3R <> 0)$ **então**

6: $Estática_3R(Cin_Inv_3R)$;

7: $F_{iso_3R}(Estática_3R, \tau_{amax}, \tau_{bmax}, \tau_{cmax})$;

8: $Mapa_Iso(x, y) = F_{iso_3R}$;

9: **Se não**

10: $Mapa_Iso(x, y) = 0$;

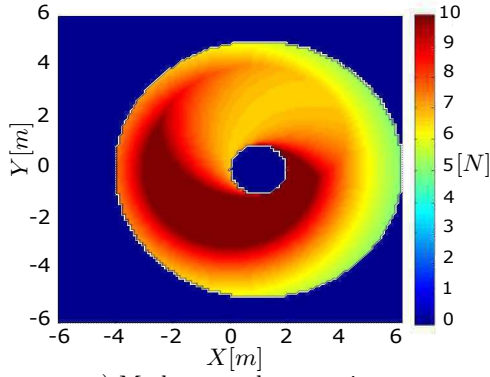
11: **Fim Se**

12: **Fim Para**

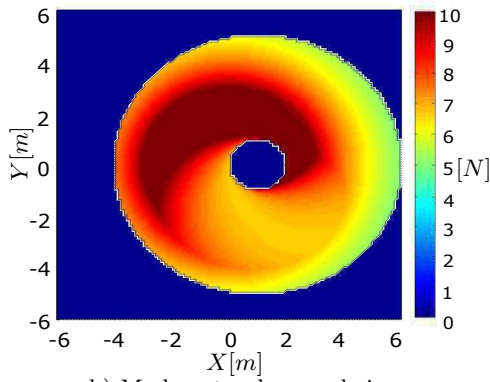
13: **Fim Para**

14: **Fim**

Os mapas das forças isotrópicas para o manipulador 3R foram obtidos através do Algoritmo 1 para cada modo de trabalho, ou seja, para cotovelo para cima e para cotovelo para baixo, como são apresentados na Figura 4. Para realizar uma análise mais profunda sobre o comportamento das máximas forças isotrópicas no robô 3R, diferentes orientações do efetuador final foram propostas, obtendo uma variedade de mapas. Os mapas das forças isotrópicas para o robô 3R são apresentados nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13.

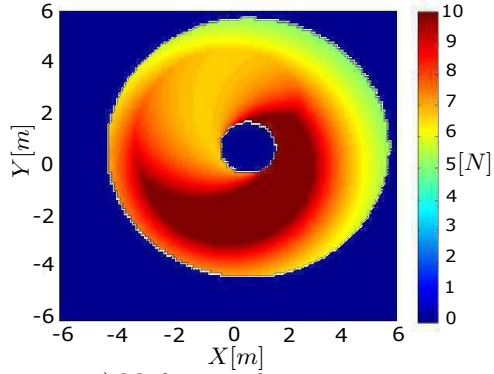


a) Modo cotovelo para cima.

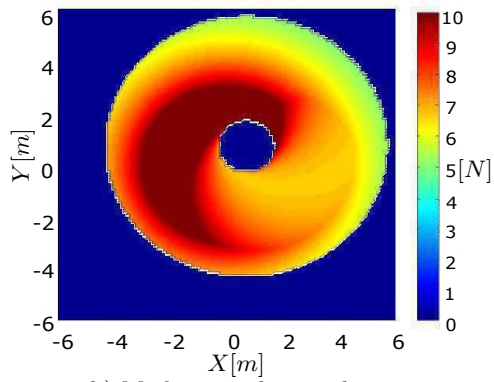


b) Modo cotovelo para baixo.

Figura 9 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 0° .



a) Modo cotovelo para cima.



b) Modo cotovelo para baixo.

Figura 10 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 45° .

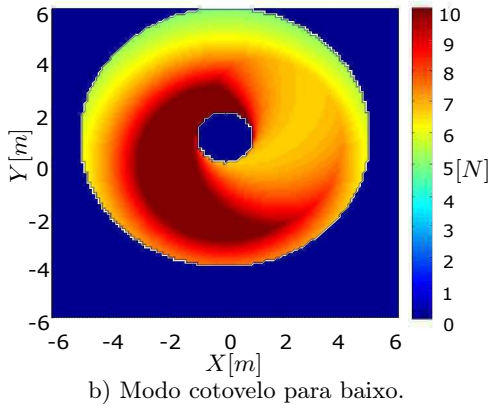
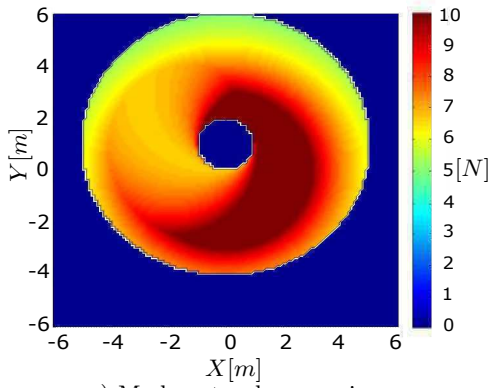


Figura 11 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 90° .

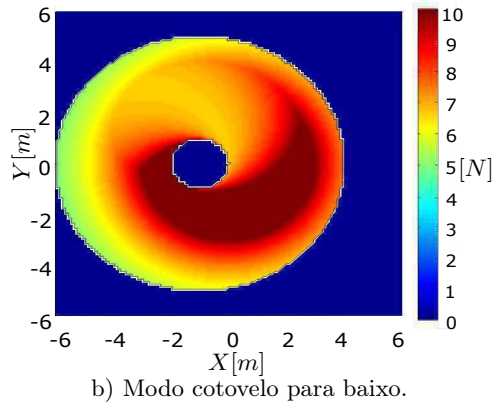
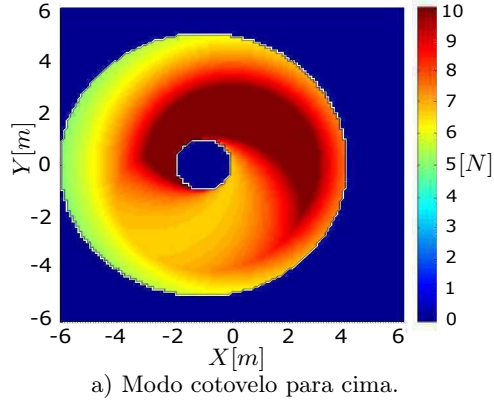
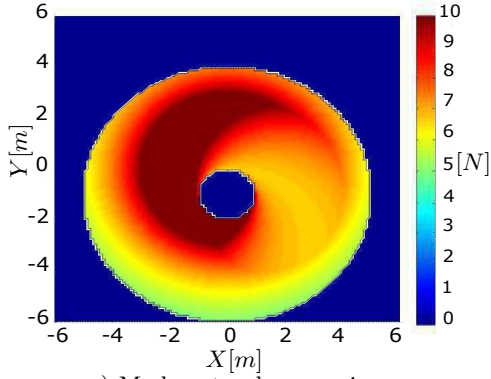
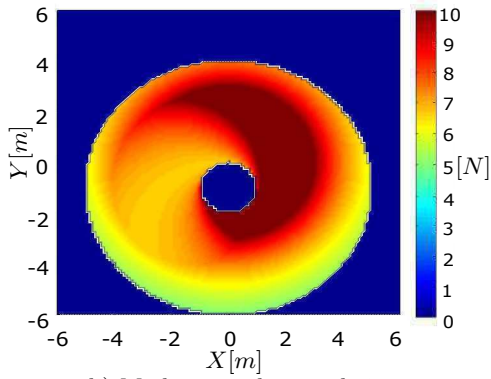


Figura 12 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 180° .



a) Modo cotovelo para cima.



b) Modo cotovelo para baixo.

Figura 13 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $3R$, com orientação do efetuador final igual a 270° .

Nas figuras anteriores, os tons de cor indicam as áreas com maior capacidade de forças isotrópicas que o efetuador final pode aplicar ou suportar dentro seu espaço de trabalho. O círculo do centro de cor azul, são os pontos onde o efetuador final não consegue atingir porque o comprimento do último elo é muito curto.

Os resultados obtidos neste capítulo, constituem um avanço no estudo da capacidade de força nos manipuladores seriais. Uma vantagem deste algoritmo é que sua a velocidade de reposta é rápida o qual permite que seja contemplado em aplicações que requerem uma resposta em tempo real em termos de manipulação de força, como é o caso de polimento de peças, usinagem, entre outros.

4.1 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas necessárias para determinar a capacidade de força isotrópica através do modelo estático do manipulador serial planar de tipo 3R. O método de fator de escala clássico e o de fator de escala modificado foram apresentados, permitindo obter um modelo matemático que determina a força isotrópica de forma rápida e direta sem uso de algoritmos de otimização. Por último foram apresentados os mapas que indicam as regiões com maior capacidade de força isotrópica dentro da área de trabalho do manipulador, para cada modo de trabalho que este possa executar.

5 MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DA TAREFA NAS REGIÕES DO MAPA COM MAIOR CAPACIDADE DE FORÇA ISOTRÓPICA VIA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Nos últimos anos, várias abordagens têm sido utilizadas para definir a posição ótima das tarefas nos espaços de trabalho do manipulador. Fardanesh e Rastegar (1988) apresentou uma nova abordagem para a localização ideal de uma tarefa prescrita no espaço de trabalho de um manipulador robótico, onde o tempo de ciclo para um conjunto de movimentos específicos em linha reta de tempo mínimo é usado como critério de otimização. Essas informações são usadas para escolher uma boa localização inicial para a tarefa. Nelson e Donath (1990) desenvolveram um sistema de planejamento de montagem off-line que pode medir a capacidade de um robô para manipular objetos em várias posições e orientações dentro seu espaço de trabalho facilitando assim a avaliação quantitativa da posição e orientação de uma tarefa de montagem completa. O sistema tem a capacidade de otimizar o local para executar a tarefa de montagem dentro o espaço de trabalho do manipulador, implementando um método de otimização não-linear modificado. Chedmail (1990) propôs colocar o espaço da tarefa dentro o espaço de trabalho do manipulador para minimizar a diferença de volumes entre ambos espaços ou a distância de seus centros de gravidade.

A abordagem proposta neste trabalho permite alocar uma tarefa nas regiões dos mapas com maior capacidade de força isotrópica possível, onde o efetuador final tem o melhor desempenho de aplicar ou suportar uma força unitária em todas as direções para uma orientação determinada. Esta abordagem foi desenvolvida usando a técnica de otimização de evolução diferencial (ED), esta técnica foi escolhida por apresentar as seguintes características publicadas por Das e Suganthan (2011):

- Comparado com outros algoritmos padrão evolutivos, ED é muito mais simples e direto de implementar. O corpo principal do algoritmo leva quatro a cinco linhas de código para codificar em qualquer linguagem de programação. A simplicidade no código é importante para os profissionais de outros campos, possam implementar o código para resolver seus problemas específicos.
- Conforme o que indica recentes estudos sobre ED (DAS et al., 2009;

RAHNAMAYAN; TIZHOOSH; SALAMA, 2008; ZHANG; SANDERSON, 2009), apresenta melhor desempenho em comparação com vários outros como PCX, MA-S2, ALEP, CPSO-H em termos de precisão, velocidade de convergência e robustez em competições de otimização organizadas durante as conferências internacionais em Computação Evolutiva (CEC 2005).

- O número de parâmetros de controle em ED são poucos (Cr, Fs e NP). Os efeitos desses parâmetros sobre o desempenho do algoritmo são apresentados neste Capítulo.
- A complexidade do ED é baixa em comparação com alguns dos otimizadores de parâmetros reais mais competitivos como CMA-ES [S232]. Essa vantagem permite que o DE seja considerado para gerir problemas de otimização de grande escala.

O algoritmo de evolução diferencial (ED) busca sempre a minimização da função objetivo. Seu funcionamento consiste em gerar aleatoriamente soluções candidatas para o problema. Cada uma das soluções candidatas é um indivíduo da população na geração atual. Utilizando processos simples de mutação e recombinação, novas soluções são geradas e comparadas com as soluções correspondentes da geração atual. As soluções com melhor valor permanecem na geração seguinte e o processo continua até que um critério de parada estabelecido seja alcançado. No caso do algoritmo de evolução diferencial (ED), a solução com o melhor valor é a que apresenta função objetivo com menor valor (WEIHMANN et al., 2011b). Para o funcionamento do algoritmo, são empregados três parâmetros básicos de controle definidos pelo usuário. Estes parâmetros são: o número de população NP; o fator de escala F_s ; e o fator de recombinação Cr. Alguns estudos experimentais sugerem alguns valores para estes parâmetros com o objetivo de obter bons resultados. Eles são apresentados a continuação do trabalho.

5.1 ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DO ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Nessa seção, serão apresentados os critérios para a escolha dos parâmetros de controle do ED.

5.1.1 Escolha do tamanho da população

Inicialmente $NP = 10D$ foi considerado como uma boa escolha para DE encontrar um ótimo global (STORN, 1996), onde D é o número de variáveis a otimizar. No entanto, para compensar a velocidade e a credibilidade do algoritmo para encontrar o melhor valor global, foram sugeridas diferentes faixas de NP como: 5D a 10D (STORN; PRICE, 1997), 3D a 8D (GÄMPERLE; MÜLLER; KOUMOUTSAKOS, 2002) e 2D a 40D (RONKKONEN; KUKKONEN; PRICE, 2005). Um aspecto a ter em conta na população é o tamanho, quanto ela for, maior é a probabilidade de encontrar um ótimo global, mas uma população maior implica uma taxa de convergência mais lenta, requerendo um número maior de avaliações na função.

Nesse trabalho, considerou-se um tamanho de população de 100D, pois queremos garantir que o algoritmo não fique preso em um mínimo local sacrificando a velocidade de convergência. As variáveis a serem otimizadas são a posição em X , a posição em Y e a orientação θ da tarefa.

5.1.2 Escolha do fator de escala para o algoritmo de evolução diferencial

O segundo parâmetro a ser considerado é o fator de escala, F_s é geralmente escolhido entre 0,5 e 1 (STORN, 1996). Em Storn e Price (1997), diz-se que os valores de F_s menores de 0,4 e maiores de 1,0 são ocasionalmente eficazes. De tal forma que o fator de escala tem que ser estritamente maior que zero, quanto maior for o seu valor, maior é a probabilidade de o algoritmo convergir para um ótimo local (GÄMPERLE; MÜLLER; KOUMOUTSAKOS, 2002; RONKKONEN; KUKKONEN; PRICE, 2005). Se $F_s > 1$, pode resolver muitos problemas, mas a velocidade de convergência diminui, tornando-a difícil. Se $F_s \leq 1$, geralmente é obtido um resultado mais confiável e de forma mais rápida. F_s deve estar acima de um certo valor crítico para evitar a convergência prematura para uma solução sub-ótima (GÄMPERLE; MÜLLER; KOUMOUTSAKOS, 2002; RONKKONEN; KUKKONEN; PRICE, 2005), mas se F_s se torna muito grande, o número de avaliações da função cresce rapidamente para encontrar o ótimo local.

Nesse trabalho, considerou-se um valor de 0,8 para o fator de

escala. De tal forma que o algoritmo possa escapar de mínimos locais sem prejudicar sua convergência.

5.1.3 Escolha do fator de cruzamento

O último parâmetro a ser levado em conta é o fator de cruzamento. Este parâmetro controla quantos e quais componentes mutuam em cada elemento da população atual (ZAHARIE, 2009). A taxa de cruzamento é possivelmente por meio de $0 \leq Cr \leq 1$ de mistura entre os vetores de teste e alvo. Um valor maior de Cr acelera a convergência (STORN, 1996; STORN; PRICE, 1997; GÄMPERLE; MÜLLER; KOUMOUTSAKOS, 2002). Storn e Price (1997) diz-se que $Cr=0,1$ é uma boa escolha inicial, enquanto $Cr=0,9$ ou 1 pode ser tentado para aumentar a velocidade de convergência. Gämperle, Müller e Koumoutsakos (2002) afirmam que uma boa escolha está entre 0,3 e 0,9. No presente trabalho, adotou-se o valor de 0,5 para o fator de cruzamento, pois desta forma testamos a velocidade da convergência do algoritmo.

Finalmente, o conjunto de parâmetros empregados para alocação da tarefa nos mapas das máximas forças isotrópicas para o manipulador 3R é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do algoritmo da ED empregados para alocação da tarefa.

Parâmetros	Valor
Tamanho da população NP	100D
Fator de escala Fs	0,8
Fator de recombinação Cr	0,5

5.2 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO E TRATAMENTO DAS RESTRIÇÕES

O desenvolvimento de algoritmos evolutivos é caracterizado pela grande aplicabilidade em problemas de engenharia, no entanto, a maioria dos problemas contém restrições, condições que devem ser satisfeitas para que uma solução resulte útil. Estas restrições podem ser classificadas em restrições de funções de igualdade, restrições de inequações e restrições de limites de variáveis (DAS; SUGANTHAN, 2011). Um mé-

todo para tratar as restrições no problema está baseado na penalização da função objetivo. O método consiste em adicionar a função objetivo uma quantidade na penalização quando a solução não cumpre com as restrições. Como exemplo podemos considerar $f_{(x)}$ a função objetivo a ser minimizada e $g_{(x)} = 0$ e $h_{(x)} = 0$ duas funções de restrição de igualdade, a nova função objetivo $\tilde{f}_{(x)}$ que leva em consideração as restrições pode ser definida pela equação:

$$\tilde{f}_{(x)} = f_{(x)} + P_1 |g_{(x)}| + P_2 |h_{(x)}| \quad (5.1)$$

onde P_1 e P_2 são constantes que ponderam a influência de cada uma das restrições. A condição de módulo é utilizada para que valores negativos das equações de restrição também sejam penalizados. Nas restrições de inequações, a abordagem é similar, mas a penalização ocorre apenas se a condição definida não é satisfeita (WEIHMANN et al., 2011b).

5.2.1 Definição da função objetivo para alocação da tarefa

Na alocação da tarefa, a função objetivo é dividida em duas parcelas, conhecidas como parcela das máximas forças isotrópicas e parcela de penalizações. A parcela das máximas forças isotrópicas, apresentada na equação (5.2), busca minimizar a função objetivo, a componente $\sum F_{iso(Task)}$ representa a soma das forças isotrópicas dentro a área da tarefa para uma determinada posição e orientação dentro do mapa.

$$F_{iso_{max}} = \frac{1}{\sum F_{iso(Task)}} \quad (5.2)$$

A parcela de penalizações maximiza a função objetivo evitando que os pontos avaliados estejam fora do mapa. Em outras palavras, evita que a área da tarefa fique fora do mapa. Na equação (5.3), o componente pen representa o número de penalidades por não cumprir a restrição. Esta variável assume valores elevados para eliminar as soluções que não satisfazem a função objetivo.

$$pen = pen + 9 * 10^{16} \quad (5.3)$$

Finalmente, a função objetivo é a soma da parcela das máximas forças isotrópicas e a parcela de penalizações apresentada por:

$$f_{obj} = F_{iso_{max}} + pen \quad (5.4)$$

A equação (5.4) é a função objetivo do Algoritmo 2 da pagina 85, que determina as máximas forças isotrópicas dentro a área da tarefa.

5.3 ALOCAÇÃO DA TAREFA

A alocação da tarefa é validada através de três estudos de caso. O primeiro caso é um quadrado, o segundo é um retângulo e o último caso considerado é uma linha reta. Cada uma destas tarefas é alocada em diferentes mapas de forças isotrópicas para uma determinada orientação do efetuador final e para um modo de trabalho. O principal objetivo do algoritmo é procurar a região com maiores forças isotrópicas possíveis dentro da área da tarefa em uma posição e orientação determinada pelo mesmo algoritmo. Esta área permite que o efetuador final do manipulador possa aplicar ou suportar uma força unitária em todas as direções, garantindo a força mínima requerida para execução da tarefa durante toda a sua trajetória, evitando ultrapassar os limites de força que o manipulador pode suportar ou executar em uma determinada posição.

Para facilitar a compreensão do procedimento da alocação da tarefa, será realizado um estudo sobre o modelo matemático utilizado no algoritmo a partir do plano das forças isotrópicas apresentadas nos mapas das figuras 9, 10, 11, 12 e 13. Toma-se uma região qualquer do mapa e três pontos não colineares A , B e C . Dessa forma, há um plano Π determinado por esses pontos como é apresentado na Figura 14.

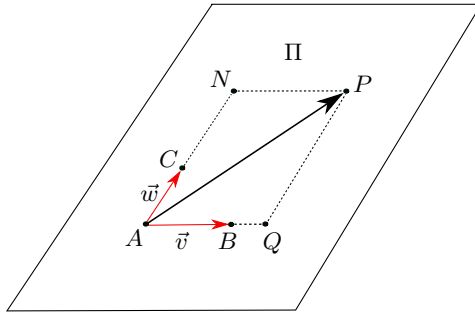


Figura 14 – Área da tarefa determinado por A, B e C e seus pontos N , P e Q .

A aplicar a regra do paralelogramo na Figura 14, tem-se:

$$\vec{AP} = \vec{AQ} + \vec{AN} \quad (5.5)$$

Como \vec{Q} é um ponto da reta $r(A, \vec{v})$ e \vec{N} é um ponto da reta $r(A, \vec{w})$, existem escalares λ e μ tais que $\vec{AQ} = \lambda\vec{v}$ e $\vec{AN} = \mu\vec{w}$, onde:

$$\vec{AP} = P - A = \lambda\vec{v} + \mu\vec{w} \quad (5.6)$$

Assim, podemos dizer que a área da tarefa está dentro do plano das forças isotrópicas Π e é determinada por A , \vec{v} e \vec{w} , satisfazendo a equação vetorial:

$$\Pi : P = A + \lambda\vec{v} + \mu\vec{w} \quad (5.7)$$

Se temos que:

$A = (x_0, y_0, z_0)$, $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$, $\vec{w} = (w_x, w_y, w_z)$ e $P = (x, y, z)$, então a equação (5.7) pode ser reescrita como uma equação matricial:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \lambda v_x + \mu w_x \\ y_0 + \lambda v_y + \mu w_y \\ z_0 + \lambda v_z + \mu w_z \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Imagine que os vetores \vec{v} e \vec{w} da Figura 14 tenham sofrido uma rotação θ em torno do eixo z , sendo suas posições anteriores \vec{r} e \vec{s} respectivamente, como se apresenta na seguinte figura:

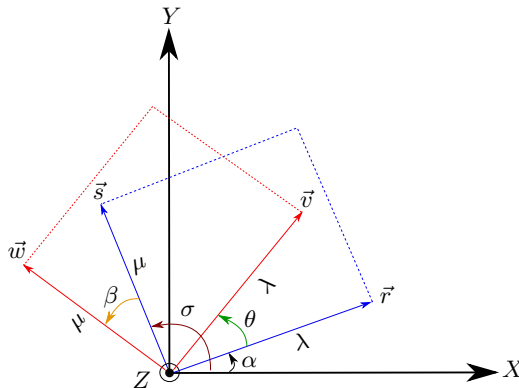


Figura 15 – Rotação dos vetores unitários \vec{v} e \vec{w} .

Na Figura 15, é possível deduzir que λ e μ , são as dimensões dos vetores \vec{v} e \vec{w} . Para o presente trabalho, seriam o comprimento da base e a altura da tarefa. Como o vetor \vec{v} é ortogonal ao vetor \vec{w} e o vetor \vec{r} é ortogonal ao vetor \vec{s} , podemos aplicar a decomposição retangular em cada um de eles.

$$\vec{r} : \begin{cases} r_x = \lambda \cos(\alpha) \\ r_y = \lambda \sin(\alpha) \\ r_z = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\vec{v} : \begin{cases} v_x = \lambda \cos(\alpha + \theta) \\ v_y = \lambda \sin(\alpha + \theta) \\ v_z = r_z \end{cases} \quad (5.10)$$

$$\vec{s} : \begin{cases} s_x = \mu \cos(\sigma) \\ s_y = \mu \sin(\sigma) \\ s_z = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\vec{w} : \begin{cases} w_x = \mu \cos(\sigma + \beta) \\ w_y = \mu \sin(\sigma + \beta) \\ w_z = s_z \end{cases} \quad (5.12)$$

Aplicando funções trigonométricas nas equações (5.10) e (5.12), tem-se:

$$\vec{v} : \begin{cases} v_x = \lambda \cos(\alpha) \cos(\theta) - \lambda \sin(\alpha) \sin(\theta) \\ v_y = \lambda \sin(\alpha) \cos(\theta) + \lambda \cos(\alpha) \sin(\theta) \\ v_z = r_z \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\vec{w} : \begin{cases} w_x = \mu \cos(\sigma) \cos(\beta) - \mu \sin(\sigma) \sin(\beta) \\ w_y = \mu \sin(\sigma) \cos(\beta) + \mu \cos(\sigma) \sin(\beta) \\ w_z = s_z \end{cases} \quad (5.14)$$

Substituindo as equações (5.9) nas equações (5.13) e substituindo as equações (5.11) nas equações (5.14), obtemos as seguintes equações:

$$\vec{v} : \begin{cases} v_x = r_x \cos(\theta) - r_y \sin(\theta) \\ v_y = r_x \sin(\theta) + r_y \cos(\theta) \\ v_z = r_z \end{cases} \quad (5.15)$$

$$\vec{w} : \begin{cases} w_x = s_x \cos(\beta) - s_y \sin(\beta) \\ w_y = s_x \sin(\beta) + s_y \cos(\beta) \\ w_z = s_z \end{cases} \quad (5.16)$$

Deduzindo que o vetor \vec{v} é ortogonal ao vetor \vec{w} e apresenta o mesmo grau de rotação que nos vetores \vec{r} e \vec{s} , como se observa na Figura 15, então, pode-se afirmar que $\beta = \theta$, de tal forma que as equações (5.15) e (5.16) podem ser reescritas em forma matricial da seguinte forma:

$$\vec{v} : \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\vec{w} : \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Considerando que os vetores \vec{r} e \vec{s} são vetores unitários, pode-se dizer que:

$$\vec{v} : \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$\vec{w} : \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

De tal forma que:

$$\vec{v} : \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\vec{w} : \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Substituindo as equações (5.21) e (5.22) na equação (5.8) e realizando simplificações, pode-se deduzir a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \lambda \cos(\theta) - \mu \sin(\theta) \\ y_0 + \lambda \sin(\theta) + \mu \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

A equação (5.23), permite transladar e orientar a tarefa em uma posição dentro do mapa das forças isotrópicas, sendo uma equação útil para o desenvolvimento do algoritmo da alocação da tarefa.

5.3.1 Algoritmo da alocação da tarefa

O algoritmo da alocação da tarefa é dividido em duas etapas: procura das máximas forças isotrópicas: Algoritmo 2, e alocação da tarefa: Algoritmo 3.

A primeira etapa consiste em buscar a melhor região das máximas forças isotrópicas dentro do mapa, cumprindo com os parâmetros da tarefa. O Algoritmo 2 tem o propósito de gerar a posição (x_0, y_0) e orientação (α) da tarefa para o algoritmo seguinte. O principal objetivo é tomar os valores (x_0, y_0, α) , escolhidos aleatoriamente pelo algoritmo diferencial *ED*, para a análise da máxima força isotrópica. Quando o algoritmo consegue minimizar o erro, retorna os valores da posição e orientação da tarefa que satisfaçam esta condição.

A segunda etapa consiste em tomar os valores entregues pela

primeira etapa para gerar a área da tarefa dentro do mapa das forças isotrópicas. O Algoritmo 3 toma os valores (x_0, y_0, α) e retorna os pontos x e y da tarefa pertencentes ao mapa das forças isotrópicas.

Algoritmo 2: Busca das máximas forças isotrópicas.

Entrada:

Define-se o comprimento da base λ ;

Define-se o comprimento da altura μ ;

Mapa da força isotrópica do mecanismo *Mapa-Iso*;

Saída: f_{obj}

1: $x_0 \leftarrow x_1$ variável aleatória definida pelo *ED*;

2: $y_0 \leftarrow x_2$ variável aleatória definida pelo *ED*;

3: $\alpha \leftarrow x_3$ variável aleatória definida pelo *ED*;

4: $F_{iso(Task)} = 0$;

5: **Para** $i = 0$ **até** $\lambda - 1$, **faça**;

6: **Para** $j = 0$ **até** $\mu - 1$, **faça**;

7: $x = x_0 + i \cos(\alpha) - j \sin(\alpha)$;

8: $y = y_0 + i \sin(\alpha) + j \cos(\alpha)$;

9: **Se** $(x > 0)$ **e** $(y > 0)$ **então**

10: $\sum F_{iso(Task)} = \sum F_{iso(Task)} + \text{Mapa}(x, y)$;

11: **Se não**

12: $pen = pen + 9999999999999999$;

13: **Fim Se**

14: **Fim Para**

15: **Fim Para**

16: $f_{obj} = \frac{1}{\sum F_{iso(Task)}} + pen$;

17: **Fim**

Algoritmo 3: Alocação da tarefa.

Entrada: $x_0, y_0, \alpha, \lambda, \mu, \text{Mapa-Iso}$;

Saída: *Mapa-Tarefa*

1: **Para** $i = 0$ **até** $\lambda - 1$, **faça**;

2: **Para** $j = 0$ **até** $\mu - 1$, **faça**;

3: $x = x_0 + i \cos(\alpha) - j \sin(\alpha)$;

4: $y = y_0 + i \sin(\alpha) + j \cos(\alpha)$;

5: $\text{Mapa-Tarefa}(x, y) = \text{Mapa-Iso}(x, y)$;

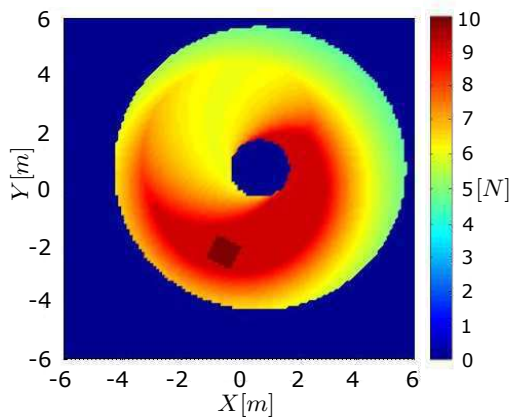
6: **Fim Para**

7: **Fim Para**

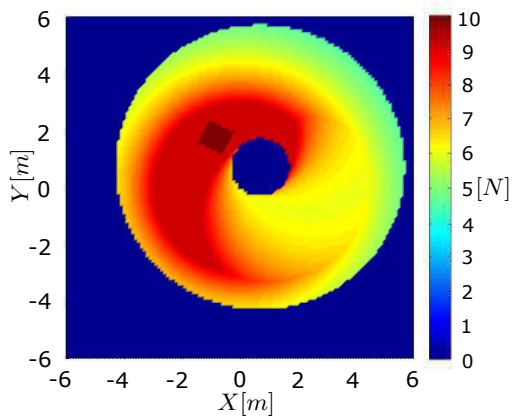
8: **Fim**

5.3.2 Alocação da tarefa

Alocação da tarefa nos mapas das forças isotrópicas é desenvolvida com os dois algoritmos apresentados anteriormente, onde três classes de tarefas foram propostas para avaliar estes algoritmos: alocação de um quadrado, alocação de um retângulo e alocação de uma linha reta. Estas tarefas são alocadas em diferentes mapas do manipulador $3R$ para cada modo de trabalho com uma determinada orientação do efetuador final. Esta abordagem permite avaliar o desempenho dos algoritmos propostos para alocação da tarefa. Os resultados obtidos para avaliação dos algoritmos são apresentados nas figuras 16, 17 e 18.

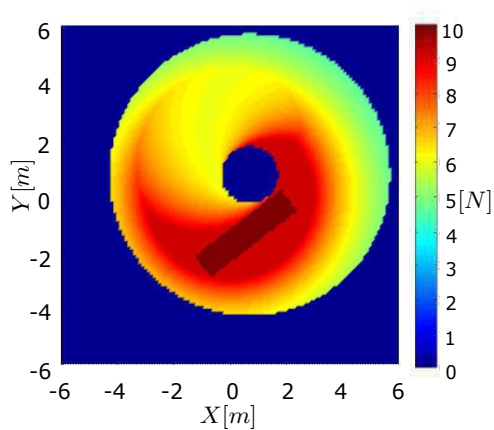


a) Modo cotovelo para cima.

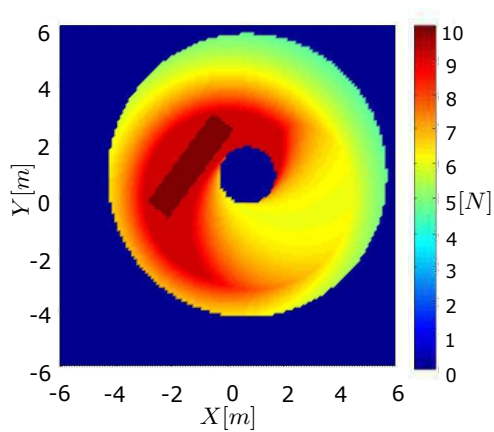


b) Modo cotovelo para baixo.

Figura 16 – Alocação de um quadrado.



a) Modo cotovelo para cima.



b) Modo cotovelo para baixo.

Figura 17 – Alocação de um retângulo.

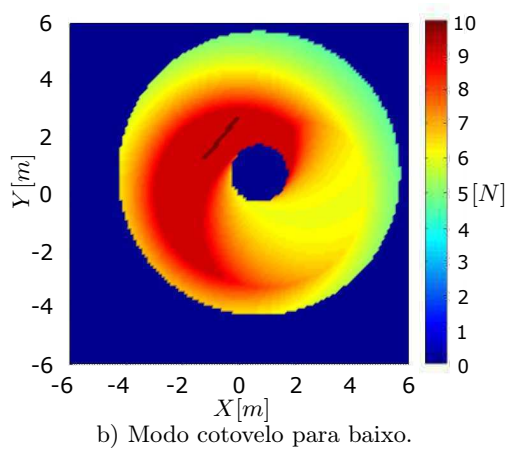
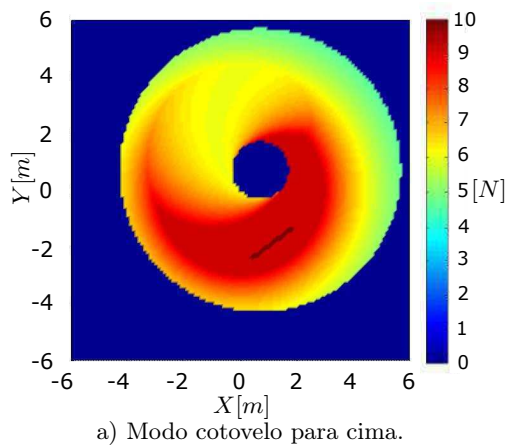


Figura 18 – Alocação de uma linha.

Tabela 4 – Parâmetros das tarefas para o manipulador 3R.

Parâmetros do quadrado	Valor
Mapa	3R
Base λ	1 m
Altura μ	1 m
Orientação do efetuador final ϕ	45°
Tempo da alocação	9,6 s
Parâmetros do retângulo	Valor
Mapa	3R
Base λ	4 m
Altura μ	1 m
Orientação do efetuador final ϕ	45°
Tempo da alocação	32,65 s
Parâmetros da linha	Valor
Mapa	3R
Comprimento λ	2 m
Espessura μ	0.2 m
Orientação do efetuador final ϕ	45°
Tempo da alocação	3,87 s

Nas simulações deste capítulo foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 4. Estes resultados avaliam o modelo proposto para alocação da tarefa dentro dos mapas de forças isotrópicas, sendo de grande importância para aplicações que requeiram uma força de referência para a execução da tarefa. Como exemplo, pode-se citar o processo de fabricação de peças mediante eliminação de material, os quais têm tabelas que indicam a força de corte necessária para a execução do processo. Desta forma, a força requerida pelo efetuador final para a execução da tarefa é conhecida, mas não se sabe em que pontos do trajeto esta força vai estar abaixo da força requerida, não sendo possível remover todo o material pela falta de força do efetuador final. O método proposto neste capítulo, é útil para essa família de problemas, pois ela nos indica qual a melhor zona para executar a tarefa, de tal modo que o operador tenha um conhecimento prévio de onde pode posicionar a peça a fim de garantir a força de corte em toda a trajetória do efetuador final. Uma das vantagens dos algoritmos propostos para a alocação da tarefa é que seu tempo de resposta é muito pequeno, de modo que operador tem os parâmetros de posição da peça em tempo real, agilizando o processo da alocação da peça para este tipo de processo.

6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EM MANIPULADORES PLANARES SERIAIS REDUNDANTES DE TIPO 4R, 5R E 6R.

Robôs redundantes possuem maiores possibilidades de movimento e, conseqüentemente, maior possibilidade de êxito na execução de tarefas. Além disso, a redundância cinemática pode ser utilizada para evitar que o robô entre em posições singulares. A redundância cinemática pode ser convenientemente aproveitada para otimizar a capacidade de aplicar ou suportar forças. Quando o número de juntas atuadas (juntas ativas) é maior do que sua mobilidade, diz-se que o manipulador apresenta redundância de atuação. Na análise estática, a principal consequência da redundância de atuação é que, conhecidas as ações presentes no efetuador, não existe uma única solução para os torques ou forças aplicadas em cada uma das juntas atuadas. Em situações em que os atuadores são exigidos ao limite, uma distribuição adequada dos esforços pode ser realizada devido à existência de redundância de atuação, reduzindo os efeitos de uma possível sobrecarga (WEIHMANN et al., 2011b). Além disso um algoritmo de otimização é necessário para determinar a capacidade de força nestes tipos de manipuladores.

Para o estudo das forças isotrópicas em manipuladores redundantes, foi usado mais uma vez o algoritmo de evolução diferencial ED. Desta vez, o algoritmo é o responsável por maximizar a força isotrópica nos manipuladores redundantes para uma determinada orientação do efetuador final. Seu funcionamento consiste em gerar aleatoriamente diferentes posturas do manipulador para maximizar a força isotrópica. A postura com melhor valor é apresentada pela função objetivo. Este procedimento é feito para cada ponto dentro o espaço de trabalho do manipulador. Estes pontos têm uma separação de $0,1\text{ m}$ de um ponto em relação a outro. Todos os mapas obtidos para os manipuladores redundantes foram desenvolvidos com o momento igual a zero ($m_z = 0$). Desta forma, obtém-se as forças isotrópicas puras em cada ponto avaliado, ou seja, quando o valor da força isotrópica (F_{iso}) não é afetada pela presença do momento.

6.1 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA DETERMINAR A MÁXIMA FORÇA ISOTRÓPICA NOS MANIPULADORES REDUNDANTES

Para determinar a máxima força isotrópica, a função objetivo é dividida em duas parcelas, a parcela da força isotrópica e a parcela de penalização. A parcela da força isotrópica é a encarregada de minimizar a função objetivo, o componente F_{iso} representa o valor da força isotrópica para uma determinada postura do manipulador avaliada em um ponto dentro seu espaço de trabalho. Enquanto a parcela de penalização pen , é a encarregada de penalizar os valores que não cumprem com as restrições da variável a otimizar.

$$f_{obj} = \frac{1}{F_{iso}} + pen \quad (6.1)$$

A equação (6.1) é a função objetivo que determina a máxima força isotrópica nos manipuladores redundantes planares seriais de tipo 4R, 5R e 6R. Como exemplo, é apresentado o Algoritmo 4 para determinar a máxima força isotrópica no manipulador 4R.

Algoritmo 4: Máxima força isotrópica.

Entrada:

Valores dos comprimentos dos elos L_a, L_b, L_c, L_d ;

Valores dos torques máximos $\tau_{a_{max}}, \tau_{b_{max}}, \tau_{c_{max}}, \tau_{d_{max}}$;

Orientação do efetuador final ϕ ;

Modo de trabalho M_d ;

Posição (x, y) ;

Saída: f_{obj}

1: $q_1 \leftarrow x_1$ variável aleatória definida pelo ED;

2: $Cin_Inv_4R(q_1, L_a, L_b, L_c, L_d, \theta, x, y, M_d)$;

3: **Se** ($Cin_Inv_4R = 0$) **então**

3: $pen = 999999999999999$;

4: $F_{iso} = 0$;

5: **Se não**

6: $Estatica_4R(Cin_Inv_4R)$;

7: $F_{iso}(Estatica_4R, \tau_{a_{max}}, \tau_{b_{max}}, \tau_{c_{max}}, \tau_{d_{max}})$;

8: $pen = 0$;

9: **Fim se**

10: $f_{obj} = \frac{1}{F_{iso}} + pen$;

11: **Fim**

Este algoritmo determina a força isotrópica no manipulador $4R$. Ele define qual é o melhor ângulo de q_1 da figura 19, minimizando a função objetivo e com o propósito de propiciar a máxima força isotrópica na posição avaliada. Este procedimento consiste em tomar um valor de q_1 , escolhido aleatoriamente pelo algoritmo diferencial ED para a análise da máxima força isotrópica. Quando o algoritmo ED consegue minimizar o erro, retorna o valor da força isotrópica.

6.2 GERAÇÃO DOS MAPAS DAS FORÇAS ISOTRÓPICAS PARA MANIPULADORES REDUNDANTES

Os mapas de forças isotópicas para manipuladores redundantes, são obtidos com o mesmo procedimento do manipulador $3R$, visto no Capítulo 4. Mas o Algoritmo 4 é incluído para determinar a máxima força isotrópica nos manipuladores redundantes propostos neste trabalho. Como exemplo, é apresentado o Algoritmo 5 para a obtenção do mapa das forças isotrópicas no manipulador $4R$.

Algoritmo 5: Algoritmo para obter o mapa das forças isotrópicas para um manipulador planar serial de tipo $4R$.

Entrada:

Define-se os valores dos elos L_a, L_b, L_c, L_d ;

Define-se os valores dos torques máximos $\tau_{a_{max}}, \tau_{b_{max}}, \tau_{c_{max}}, \tau_{d_{max}}$;

Define-se a orientação do efetuador final ϕ ;

Define-se o modo de trabalho M_d ;

Saída: $Mapa-Iso$

1: $Comp = L_a + L_b + L_c + L_d$;

2: **Para** $y = -Comp$ **até** $Comp$ **faça**

3: **Para** $x = -Comp$ **até** $Comp$ **faça**

4: $F_{iso-4R}(L_a, L_b, L_c, L_d, \tau_{a_{max}}, \tau_{b_{max}}, \tau_{c_{max}}, \tau_{d_{max}}, \theta, M_d)$;

5: $Mapa-Iso(x, y) = F_{iso-4R}$;

6: **Fim Para**

7: **Fim Para**

8: **Fim**

6.2.1 Manipulador serial planar tipo 4R

Com o Algoritmo 5, obtém-se o mapa das forças isotrópicas para cada modo de trabalho do manipulador 4R. Calcula-se a força isotrópica em cada ponto dentro de seu espaço de trabalho para uma determinada orientação do efetuador final. Este mesmo procedimento foi desenvolvido para os manipuladores redundantes 5R e 6R. Diferentes tipos de orientações do efetuador final foram propostos, com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada sobre o comportamento das máximas forças isotrópicas nestes tipos de manipuladores.

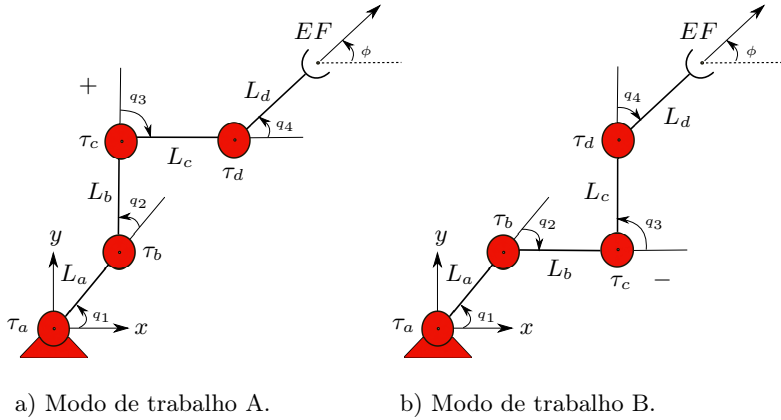


Figura 19 – Manipulador serial planar tipo 4R.

O manipulador serial apresentado na Figura 19, possui quatro juntas rotativas ($R = 4$), sua mobilidade é ($M = 4$) e seu grau de restrição bruto é três ($C_n = 3$). A solução da estática para este manipulador pode ser generalizada, conforme equação (6.2).

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \\ \tau_c \\ \tau_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(EF) \\ F_y(EF) \\ m_z(EF) \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Os resultados para este manipulador foram desenvolvidos com os parâmetros apresentados na Tabela 5. Os valores do algoritmo *ED* são selecionados heurísticamente para melhorar o tempo de reposta. Este

algoritmo faz o cálculo da força isotrópica para uma malha de 40.000 pontos contidos no espaço de trabalho do manipulador $4R$, considerando uma separação de 0.1 m de um ponto em relação a outro.

Tabela 5 – Parâmetros do manipulador planar serial de tipo $4R$.

Parâmetros do manipulador $4R$	Valor
Comprimento L_a	4 m
Comprimento L_b	3 m
Comprimento L_c	2 m
Comprimento L_d	1 m
Torque Máximo τ_a	± 40 N m
Torque Máximo τ_b	± 30 N m
Torque Máximo τ_c	± 20 N m
Torque Máximo τ_d	± 10 N m
Parâmetros do algoritmo ED	Valor
Tamanho da população NP	100
Fator de escala F_s	0,8
Fator de recombinação CR	0,5
Variável a ser otimizadas	Símbolo
Ângulo q_1	θ
Orientação do efetuador final ϕ	Valor
Mapa da Figura 20	0^0
Mapa da Figura 21	45^0
Mapa da Figura 22	90^0
Mapa da Figura 23	180^0
Mapa da Figura 24	270^0

Os mapas das forças isotópicas para o manipulador $4R$ foram obtidos para cada modo de trabalho apresentado na Figura 19 e para uma combinação entre eles. A fim de se obter uma análise mais detalhada sobre o comportamento das máximas forças isotrópicas neste tipo de manipuladores, diferentes tipos de orientações do efetuador final foram propostos, obtendo uma variedade de mapas. Essa variedade de mapas permite chegar a novas conclusões sobre a capacidade de força no manipulador $4R$. Os resultados dos mapas das forças isotrópicas para este tipo de manipuladores, são apresentados nas seguintes figuras:

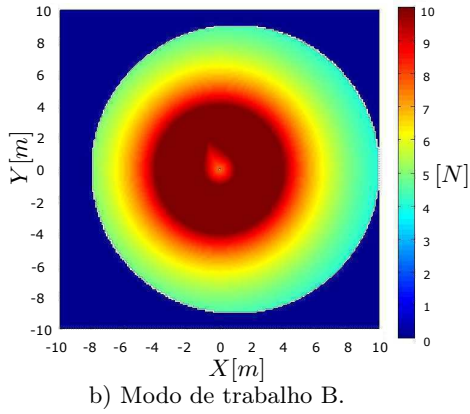
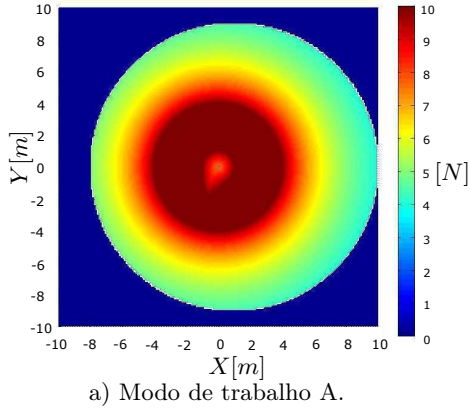


Figura 20 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 0° .

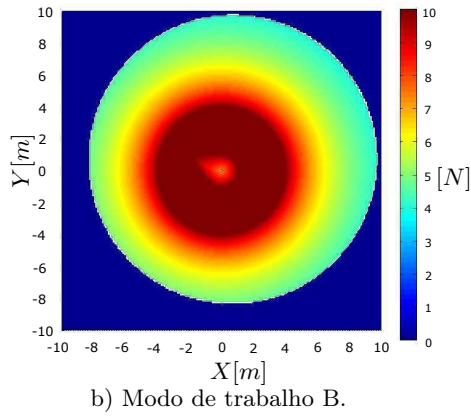
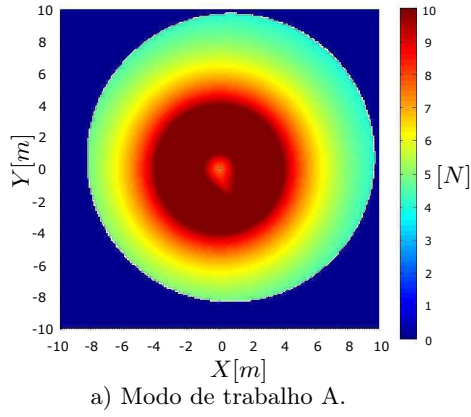


Figura 21 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 45° .

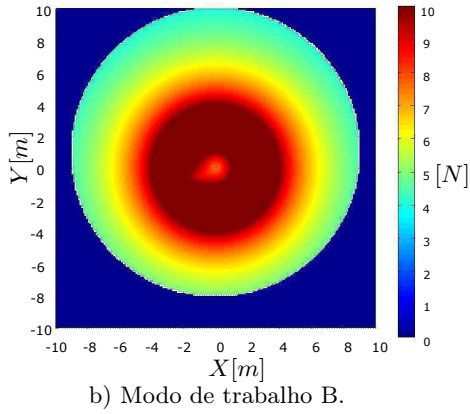
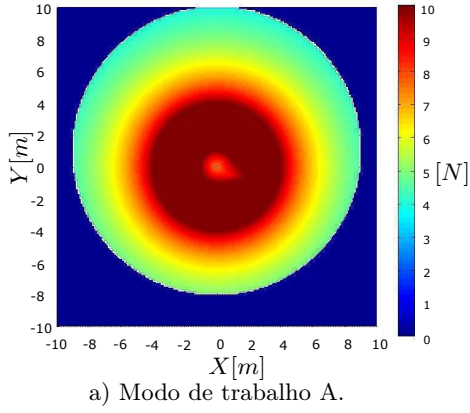
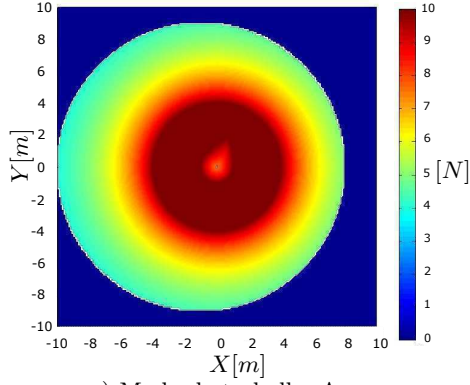
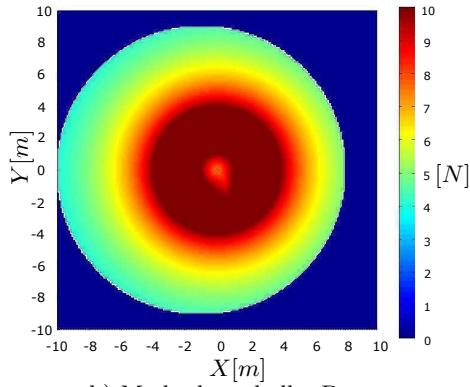


Figura 22 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 90° .



a) Modo de trabalho A.



b) Modo de trabalho B.

Figura 23 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $4R$, com orientação do efetuador final igual a 180° .

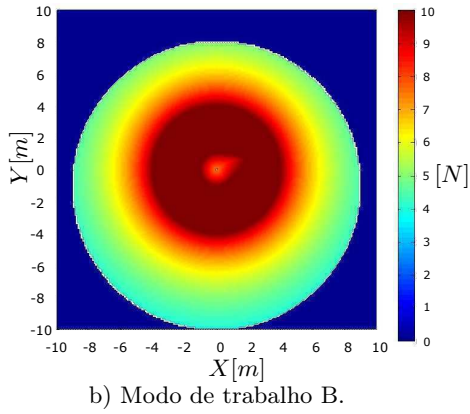
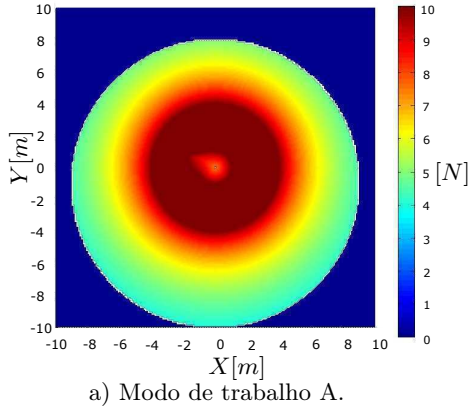


Figura 24 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 4R, com orientação do efetuador final igual a 270° .

6.2.2 Manipulador serial planar tipo 5R

Os modos de trabalho do manipulador planar serial de tipo 5R, utilizados no Algoritmo 5 para a obtenção dos mapas, são apresentados na seguinte figura:

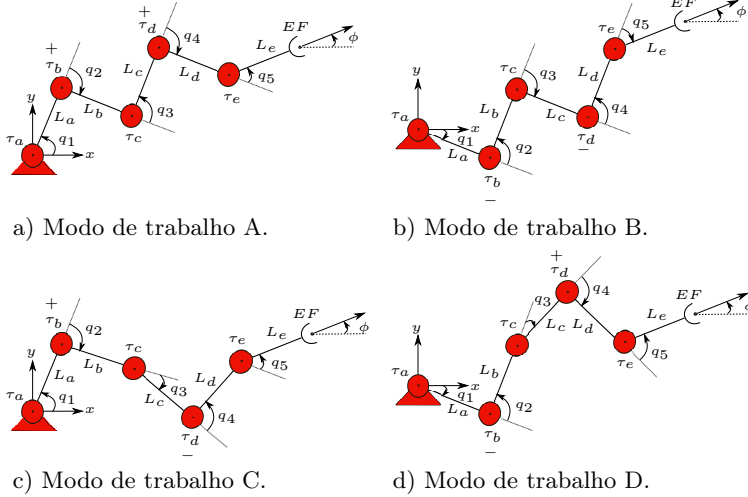


Figura 25 – Manipulador serial planar tipo 5R.

Este manipulador serial possui cinco juntas rotativas ($R = 5$), sua mobilidade é ($M = 5$) e seu grau de restrição bruto é três ($C_n = 3$). A solução da estática para este manipulador pode ser generalizado, conforme equação 6.3.

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \\ \tau_c \\ \tau_d \\ \tau_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(EF) \\ F_y(EF) \\ m_z(EF) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Os resultados obtidos para este tipo de manipulador foram desenvolvidos com os parâmetros apresentados na Tabela 6. O algoritmo diferencial *ED*, faz o cálculo da força isotrópica para uma malha de 90.000 pontos contidos no espaço de trabalho do manipulador 5R, considerando os pontos da malha com separação de 0.1 m de um ponto em

relação a outro.

Tabela 6 – Parâmetros do manipulador planar serial de tipo $5R$.

Parâmetros do manipulador $5R$	Valor
Comprimento L_a	5 m
Comprimento L_b	4 m
Comprimento L_c	3 m
Comprimento L_d	2 m
Comprimento L_e	1 m
Torque Máximo τ_a	± 50 N m
Torque Máximo τ_b	± 40 N m
Torque Máximo τ_c	± 30 N m
Torque Máximo τ_d	± 20 N m
Torque Máximo τ_e	± 10 N m
Parâmetros do algoritmo ED	Valor
Tamanho da população NP	200
Fator de escala F_s	0,8
Fator de recombinação CR	0,5
Variáveis a serem otimizadas	Símbolo
Posição da junta R_3	xy
Orientação do efetuador final ϕ	Valor
Mapa da Figura 26	0^0
Mapa da Figura 27	45^0
Mapa da Figura 28	90^0
Mapa da Figura 29	180^0
Mapa da Figura 30	270^0

Uma variedade de mapas é obtida para a análise da capacidade de forças isotrópicas no manipulador $5R$. Diferentes tipos de orientações do efetuador final foram propostos para ter uma percepção mais profunda sobre o desempenho das forças isotrópicas em todo o espaço de trabalho deste manipulador. Esta análise é realizada para cada modo de trabalho, com o objetivo de conhecer o comportamento das forças isotrópicas nas diferentes posturas do manipulador. Este tipo de análise nos permite chegar a novas conclusões sobre a capacidade de força no manipulador $5R$.

Os mapas das forças isotrópicas do manipulador serial planar de tipo $5R$ obtidos para cada modo de trabalho são apresentados nas figuras seguintes.

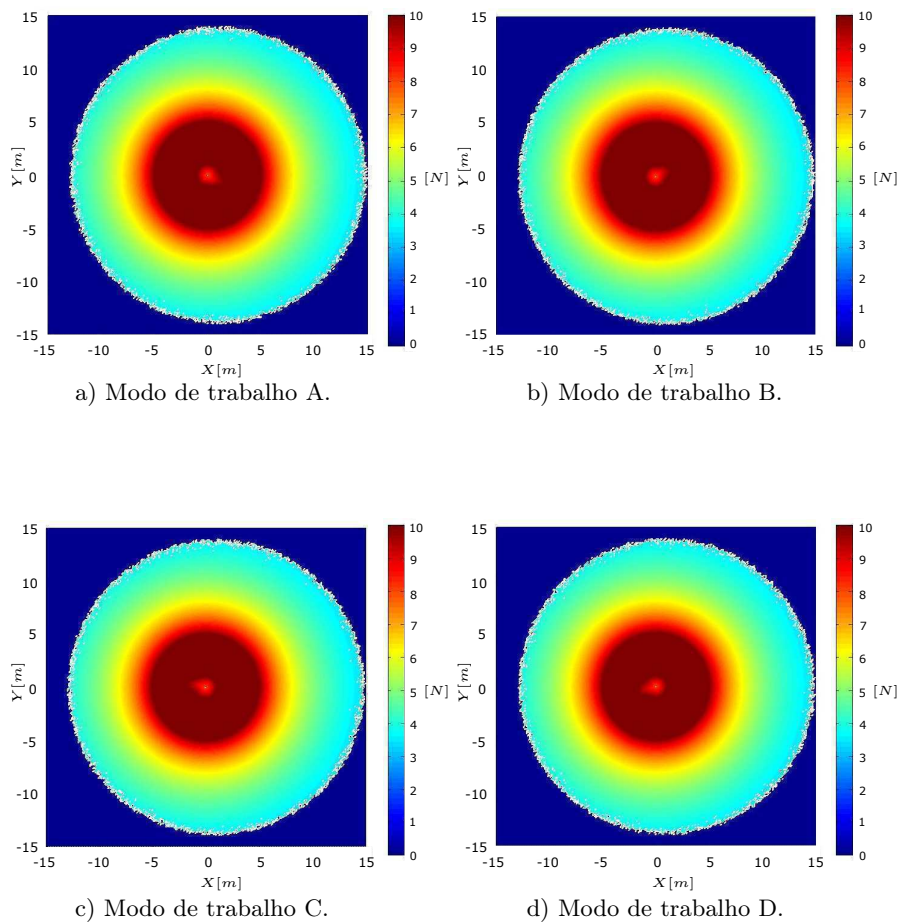


Figura 26 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $5R$, com orientação do efetuador final igual a 0° .

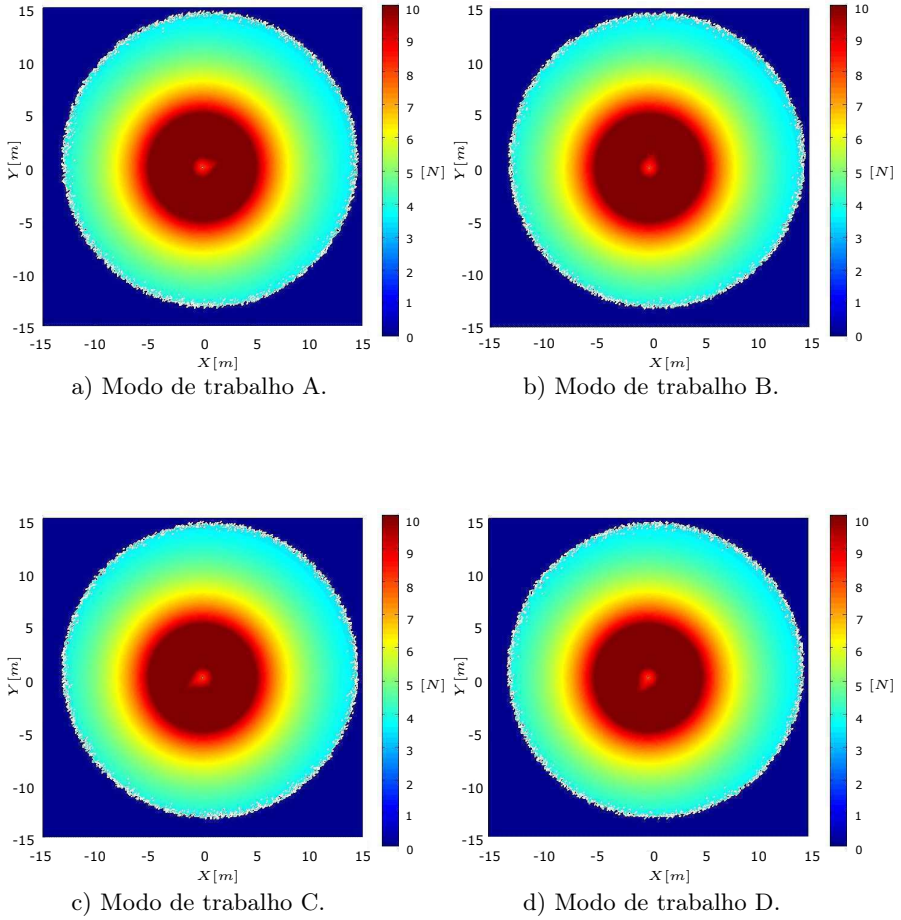


Figura 27 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 45° .

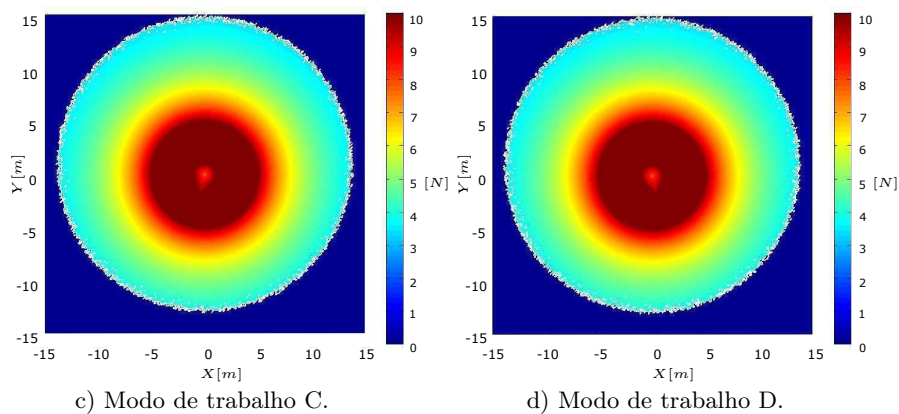
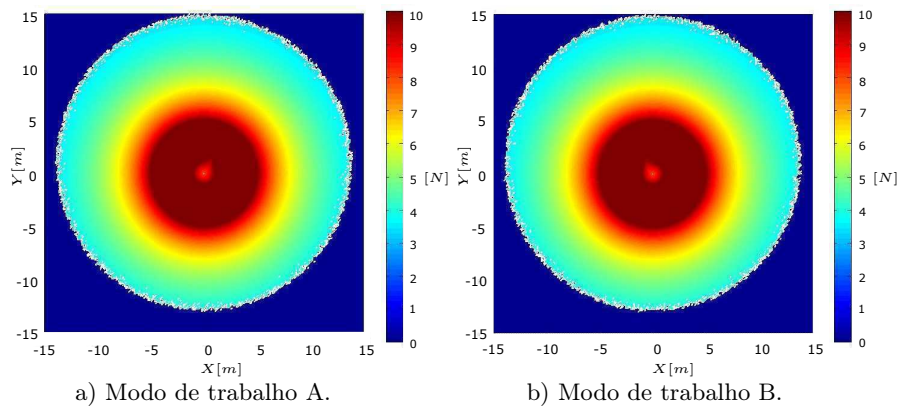


Figura 28 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 90° .

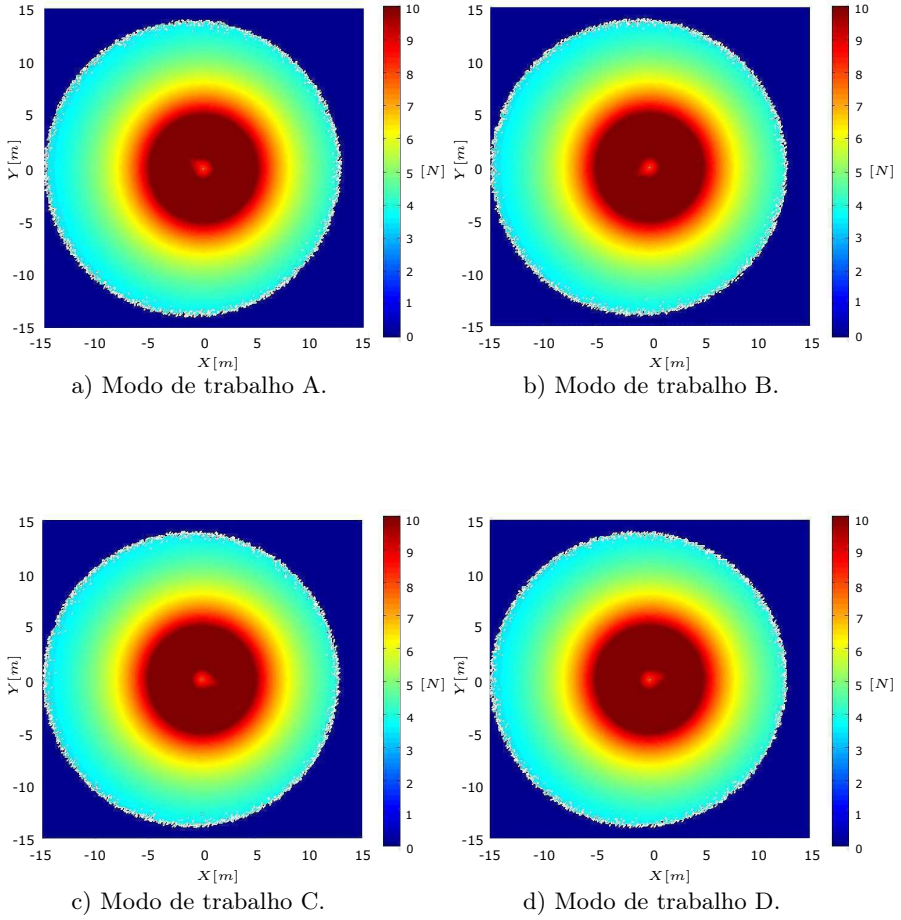


Figura 29 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 5R, com orientação do efetuador final igual a 180° .

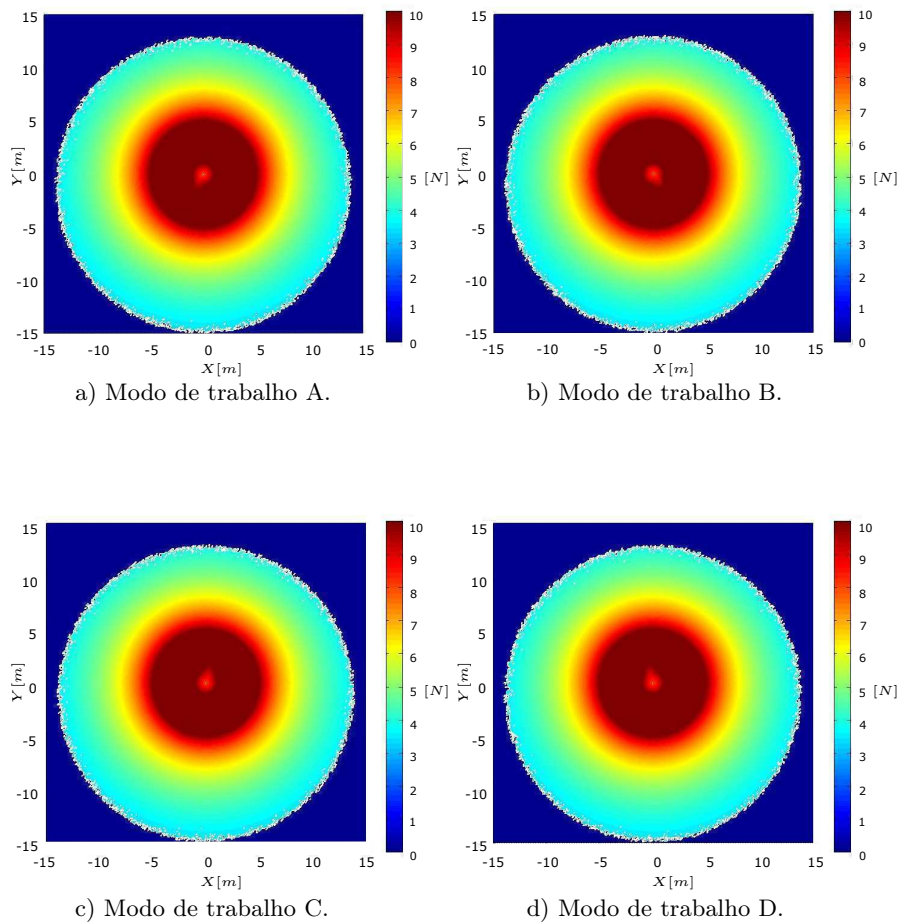


Figura 30 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador $5R$, com orientação do efetuador final igual a 270° .

6.2.3 Manipulador serial planar tipo 6R

Os modos de trabalho simulados para o manipulador planar serial de tipo 6R utilizados no Algoritmo 5, são apresentados na seguinte figura:

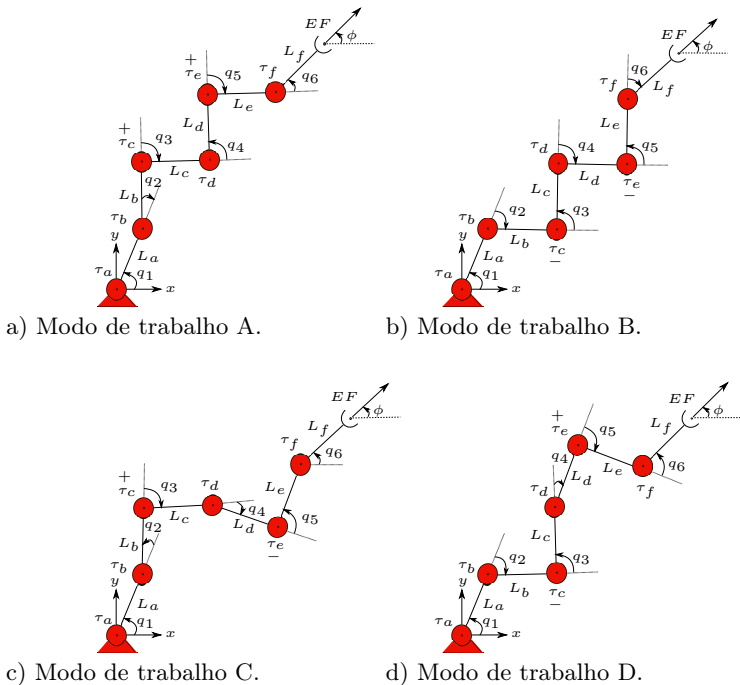


Figura 31 – Manipulador serial planar tipo 6R.

Este manipulador serial possui cinco juntas rotativas ($R = 6$), sua mobilidade é ($M = 6$) e seu grau de restrição bruto é três ($C_n = 3$). A solução da estática para este manipulador pode ser generalizada, conforme equação (6.4).

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \\ \tau_c \\ \tau_d \\ \tau_e \\ \tau_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} \\ a_{6,1} & a_{6,2} & a_{6,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(EF) \\ F_y(EF) \\ m_z(EF) \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Os resultados obtidos para este manipulador foram desenvolvidos com os parâmetros apresentados na Tabela 7. O algoritmo *ED*, faz o cálculo da força isotrópica para uma malha de 176.400 pontos contidos no espaço de trabalho do manipulador *6R*, considerando os pontos da malha com uma separação de 0.1 m de um ponto em relação a outro.

Tabela 7 – Parâmetros do manipulador planar serial de tipo *6R*.

Parâmetros do manipulador 6R	Valor
Comprimento L_a	6 m
Comprimento L_b	5 m
Comprimento L_c	4 m
Comprimento L_d	3 m
Comprimento L_e	2 m
Comprimento L_f	1 m
Torque Máximo τ_a	± 60 N m
Torque Máximo τ_b	± 50 N m
Torque Máximo τ_c	± 40 N m
Torque Máximo τ_d	± 30 N m
Torque Máximo τ_e	± 20 N m
Torque Máximo τ_f	± 10 N m
Parâmetros do algoritmo ED	Valor
Tamanho da população NP	300
Fator de escala F_s	0,8
Fator de recombinação CR	0,5
Variáveis a serem otimizadas	Símbolo
Ângulo q_1	θ
Posição da junta R_4	xy
Orientação do efetuador final ϕ	Valor
Mapa da Figura 32	0^0
Mapa da Figura 33	45^0
Mapa da Figura 34	90^0
Mapa da Figura 35	180^0
Mapa da Figura 36	270^0

Os resultados dos mapas das forças isotrópicas para este tipo de mecanismo, são apresentados nas seguintes figuras:

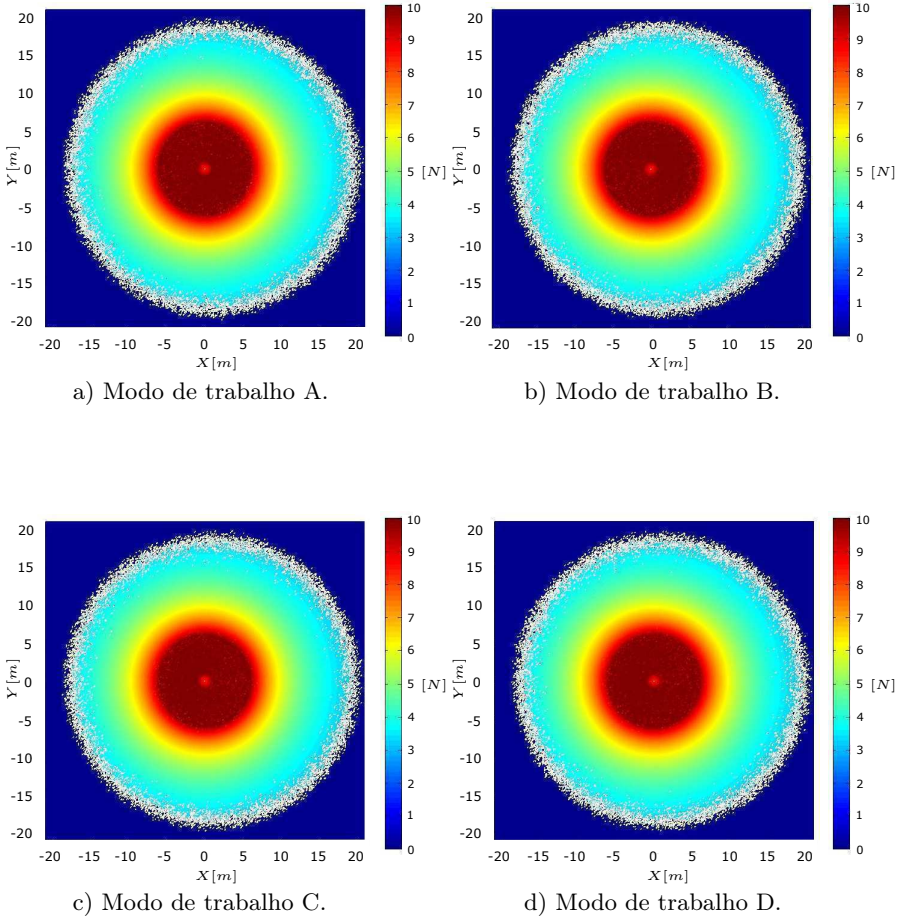


Figura 32 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 0° .

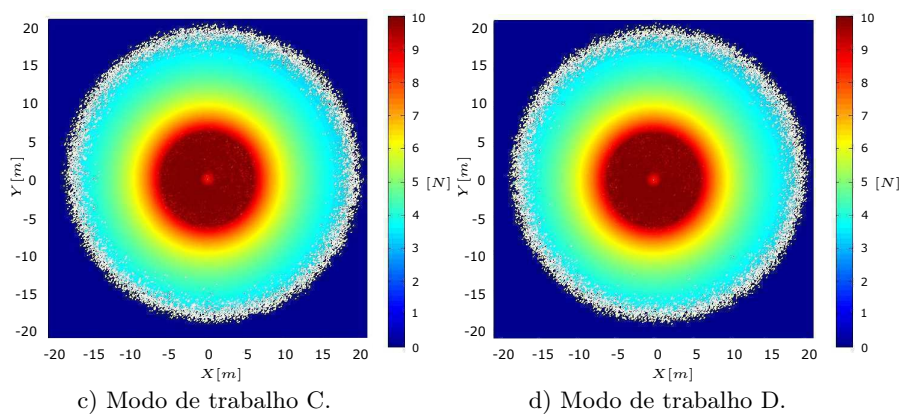
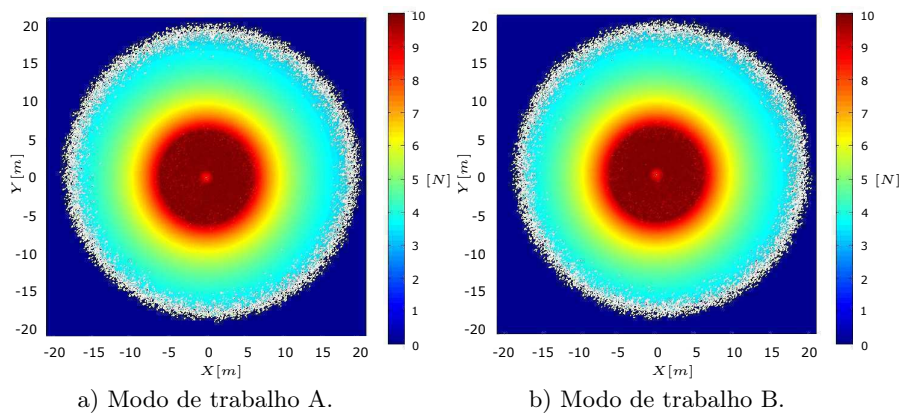


Figura 33 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 45° .

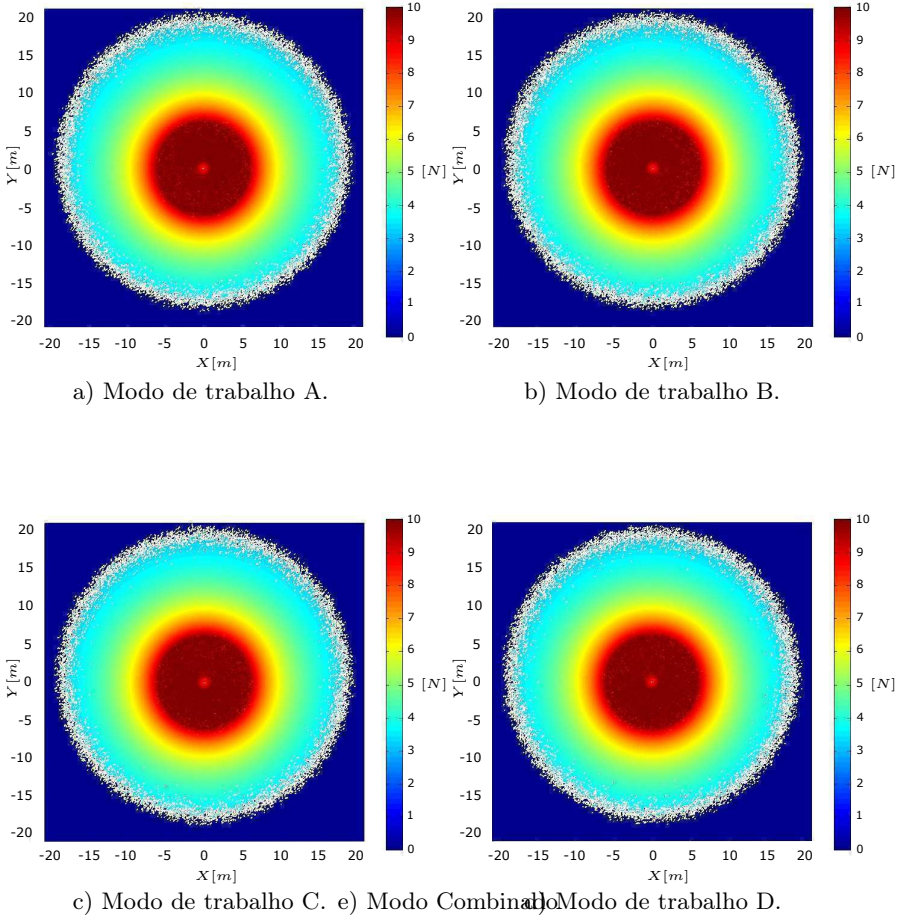


Figura 34 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 90° .

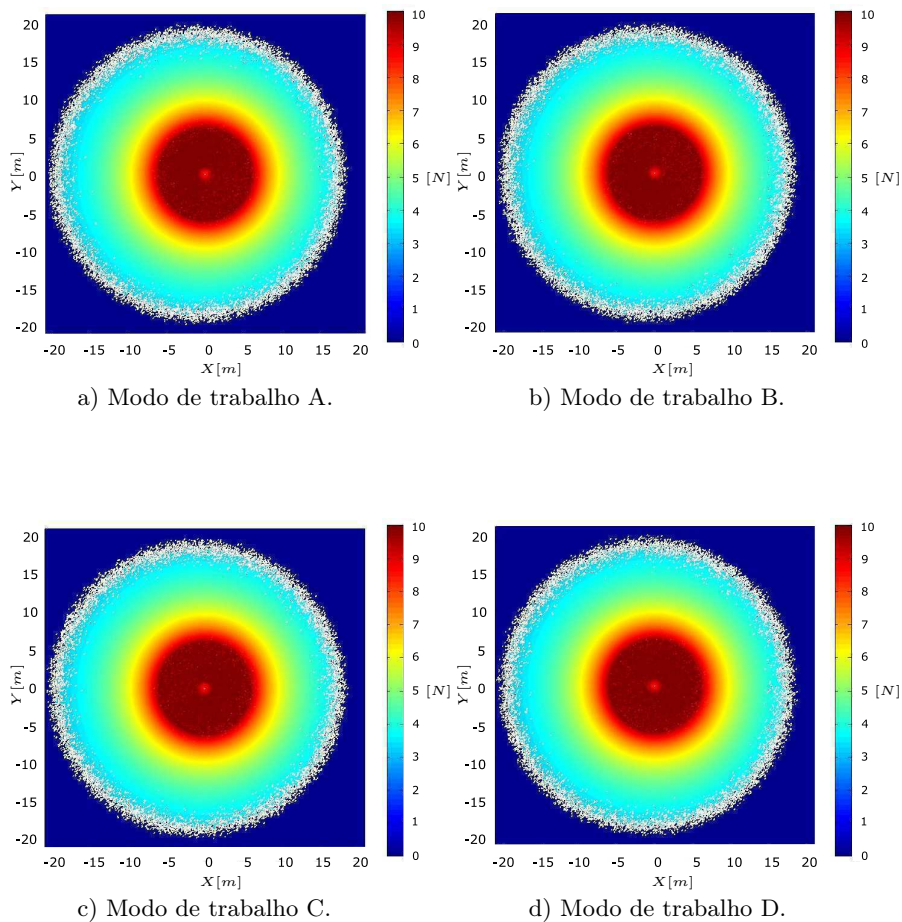


Figura 35 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 180° .

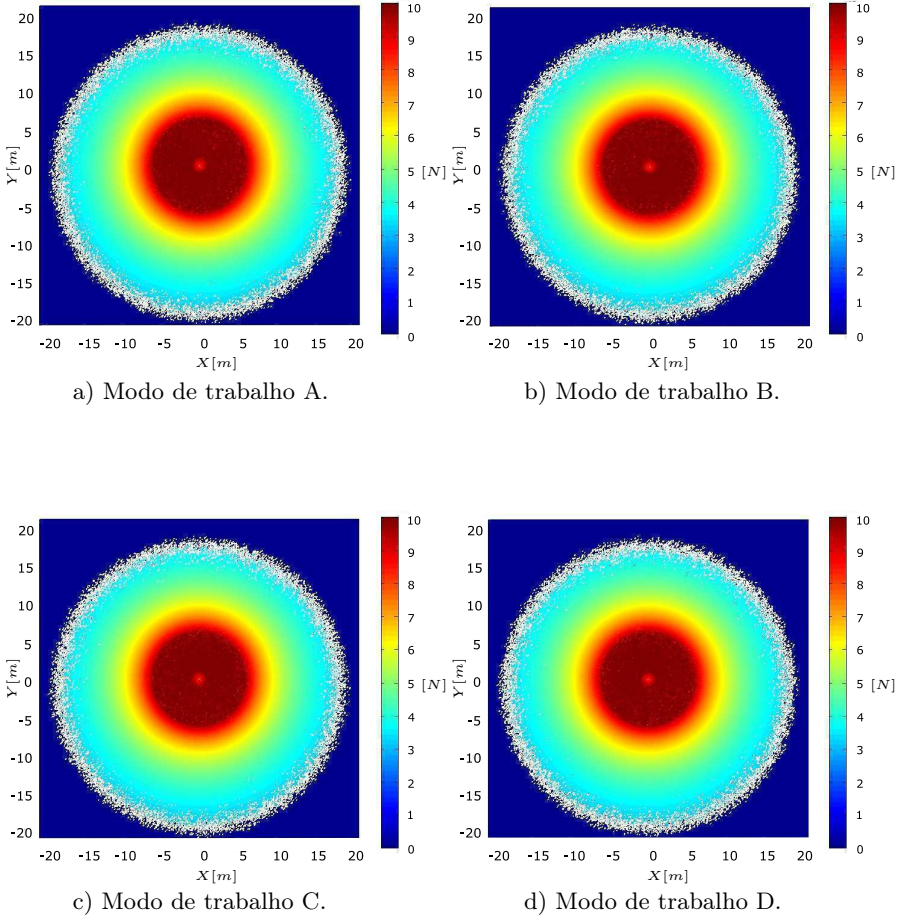


Figura 36 – Mapa da máxima força isotrópica para o manipulador 6R, com orientação do efetuador final igual a 270° .

Note-se que nos mapas apresentados para os manipuladores redundantes de tipo $4R$, $5R$ e $6R$, as áreas com maior capacidade de forças isotrópicas aumentam. Assim, pode-se concluir que graus de liberdade adicionais, neste tipo de manipuladores, permitem obter maior área da capacidade de força em relação aos manipuladores $3R$. Desta forma estes tipos de manipuladores podem ser programados para recorrer trajetórias mais longas, garantindo a força requerida para execução da tarefa em todo seu trajeto.

Nas Figuras 26 a 30, os pontos brancos que se encontram no limite da área de trabalho são causados pela proximidade à singularidade do manipulador, levando à divergência do algoritmo nessa região.

Os resultados apresentados neste Capítulo são obtidos com o método da capacidade de força isotrópica. Mas o Algoritmo 5 foi necessário para obtenção dos mapas nos manipuladores redundantes, apresentando uma diferença importante no tempo de cálculo da força isotrópica para obtenção destes resultados.

Tabela 8 – Comparação dos tempos de cálculo necessários para a obtenção dos mapas.

Manipulador	Tempo obtenção dos mapas	Processador
Manipulador $3R$	2,75 s	P4 2.4 GHz
Manipulador $4R$	12.000 s \approx 3,33 h	P4 2.4 GHz
Manipulador $5R$	58.680 s \approx 16,3 h	P4 2.4 GHz
Manipulador $6R$	299.880 s \approx 83,3 h	P4 2.4 GHz

Note-se que o tempo de cálculo necessários para a obtenção dos mapas apresentado na Tabela 8, o manipulador serial de tipo $3R$ apresenta o melhor tempo de resposta, isso acontece porque o Algoritmo 1 faz o cálculo da força isotrópica sem o uso do algoritmo diferencial ED. Os manipuladores de tipo $4R$, $5R$ e $6R$, apresentam tempo de resposta longo, pois o Algoritmo 5 precisa do algoritmo ED para determinar a força isotrópica para cada ponto avaliado dentro o espaço de trabalho do manipulador.

6.2.4 Alocação da tarefa

Para avaliar a alocação da tarefa nos manipuladores seriais planares $4R$, $5R$ e $6R$, três classes diferentes de tarefa foram propostas

para serem executadas pelos manipuladores redundantes: alocação de um quadrado, alocação de um retângulo e alocação de uma linha reta. Estas tarefas são alocadas de forma automática em diferentes mapas para diferentes modo de trabalho com uma determinada orientação do efetuador final, empregando os algoritmos apresentados no Capítulo 5. Esta abordagem permite avaliar o desempenho dos algoritmos propostos neste tipo de manipuladores. Os resultados obtidos para avaliação dos algoritmos são apresentados nas seguintes figuras:

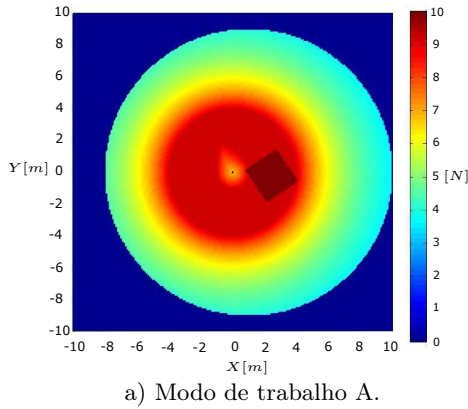


Figura 37 – Alocação de um quadrado no mapa do manipulador 4R.

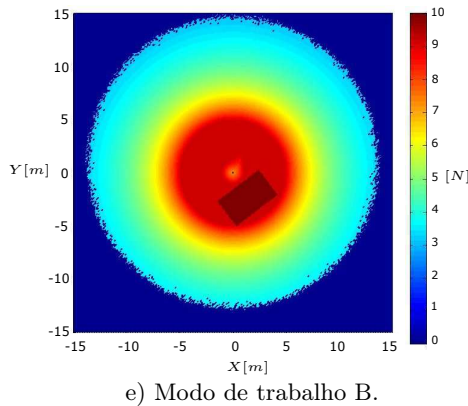
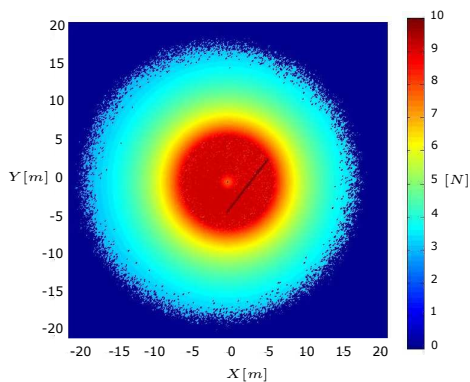


Figura 38 – Alocação de um retângulo no mapa do manipulador 5R.



e) Modo trabalho C.

Figura 39 – Alocação de uma linha no mapa do manipulador 6R.

Tabela 9 – Parâmetros das tarefas para manipuladores redundantes.

Parâmetros do quadrado	Valor
Mapa	4R
Base λ	2,5 m
Altura μ	2,5 m
Orientação do efetuador final ϕ	0°
Tempo da alocação	56,76 s
Parâmetros do retângulo	Valor
Mapa	5R
Base λ	5 m
Altura μ	3 m
Orientação do efetuador final ϕ	90°
Tempo da alocação	131,4 s
Parâmetros da linha	Valor
Mapa	6R
Comprimento λ	9 m
Espessura μ	0,3 m
Orientação do efetuador final ϕ	180°
Tempo da alocação	52,21 s

Os resultados apresentados nas figuras 37, 38 e 39, foram obtidos com os parâmetros apresentados na Tabela 9. Estes resultados avaliam o modelo proposto para alocação da tarefa dentro dos mapas das forças isotrópicas nos manipuladores redundantes.

6.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os resultados apresentados nesta seção permitem concluir que o método proposto para determinar a capacidade de força isotrópica também pode ser usado para manipuladores redundantes seriais de tipo 4R, 5R e 6R, o que até o momento não se observou nas referências citadas neste trabalho. Os mapas da capacidade de força isotrópica são resultados diretos que nos permitem deduzir novas conclusões sobre a vantagem que os manipuladores redundantes têm em relação aos manipuladores não redundantes, já que conseguem atingir uma área maior de capacidade de força sem precisar trocar seu modo de trabalho, evitando que o manipulador entre em configurações singulares durante o seguimento de uma trajetória.

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um estudo de forças isotrópicas em manipuladores seriais planares. O método da capacidade de força isotrópica permitiu obter mapas de forças isotrópicas no espaço de trabalho dos manipuladores estudados, possibilitando conhecer as áreas com maior capacidade de força isotrópica. A teoria de helicoides e o método de Davies são ferramentas poderosas que contribuem no desenvolvimento da análise do sistema em forma desacoplada. Permite realizar a inversão da matriz de variáveis secundárias, possibilitando a determinação da estática em manipuladores simples como são os manipuladores seriais $3R$ e em manipuladores mais complexos como são os manipuladores seriais $4R$, $5R$, e $6R$.

O método de fator de escala modificado apresentado por (MEJIA et al., 2015), foi usado para desenvolver o modelo matemático que determina a máxima força isotrópica de forma rápida e direta e sem uso de algoritmos de otimização para um momento desejado.

Quando um manipulador redundante muda de postura, a força isotrópica é alterada, permitindo que algumas posturas apresentem melhor desempenho que outras. A estratégia evolutiva denominada evolução diferencial (*ED*), foi utilizada para identificar as posturas que apresentam maior força isotrópica. A escolha desta estratégia foi feita por apresentar melhores características de desempenho em problemas não lineares e não convexos. Comparada com a maioria das outras técnicas heurísticas, a *ED* é direta e simples de programar. O código básico pode ser facilmente adaptado para problemas específicos.

As funções objetivo propostas neste trabalho são compostas da parcela de força isotrópica e a parcela de penalização. A parcela de força isotrópica é a parcela principal, representando efetivamente o objetivo a ser alcançado. A parcela de penalização garante que as soluções encontradas são fisicamente realizáveis, levando o manipulador a configurações possíveis de serem alcançadas.

O método de capacidade da força isotrópica junto com o método de alocação da tarefa podem ser uma ferramenta importante em aplicações que requeiram uma força determinada.

Finalmente a conclusão mais importante é que o modelo matemático que determina a máxima força isotrópica, nos dá um avanço no estudo da capacidade de força em manipuladores seriais. Nos casos apresentados foram verificados o comportamento das forças isotrópicas dentro a área de trabalho dos manipuladores, este estudo antes não podia ser realizados pelo alto custo computacional que este tipo de análise envolve.

7.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A principal contribuição do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma abordagem para obtenção de mapas que apresentam as forças isotrópicas no espaço do trabalho nos manipuladores seriais planares de tipo 3R, 4R, 5R e 6R. Esta abordagem permite conhecer o comportamento das forças isotrópicas dentro esse espaço para uma determinada orientação do efetuador final. Os mapas apresentam as áreas com melhor capacidade de força que servem como ponto de referência para alocação de uma tarefa sem ultrapassar os limites dos atuadores. O algoritmo da alocação da tarefa foi feito para orientar e deslocar a tarefa no mapa de forma automática, determinando a melhor região que contenha a máxima força isotrópica em toda área da tarefa. Desta forma estamos garantindo que a força mínima requerida para a execução da tarefa seja uniforme em toda sua área. Este abordagem pode ser importante em processos industriais como usinagem ou de corte que requeiram garantir uma força mínima requerida para execução da trajetória.

7.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento do presente trabalho poderão ser desenvolvidos trabalhos futuros, como por exemplo:

- Comprovar a viabilidade prática da modelagem proposta para este tipo de manipuladores;
- Inclusão de rigidez e forças gravitacionais no método proposto;
- Incluir efeitos dinâmicos no estudo da capacidade de força isotrópica;

- Aplicar o método da capacidade de força isotrópica em outros tipos de robôs, como os humanóides;
- Estender o método para mecanismos espaciais;

7.3 PUBLICAÇÕES

Até o momento da apresentação desta dissertação, algumas publicações foram submetidas. Estas publicações são classificadas em:

Publicações em Revista:

- Revista: Mechanisms and Machine Theory;
Status: Em revisão;
Título: Screw-based force capability method: a direct solution of force/moment problems including maximum isotropic forces;
Status Data: Mar 10, 2017.

Congresso:

- Congresso: 6th International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics – MuSMe;
Status: Em revisão;
Título: Maximum Isotropic force capability maps in cooperative systems, a practical study case;
Status Data: Mar 10, 2017.

REFERÊNCIAS

ANGELES, J. Is there a characteristic length of a rigid-body displacement? *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, v. 41, n. 8, p. 884–896, 2006.

ANGELES, J.; LÓPEZ-CAJÚN, C. S. Kinematic isotropy and the conditioning index of serial robotic manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Publications, v. 11, n. 6, p. 560–571, 1992.

BARON, L.; BERNIER, G. The design of parallel manipulators of star topology under isotropic constraint. In: *Proc. of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences*. 2001.

BICCHI, A.; MELCHIORRI, C.; BALLUCHI, D. On the mobility and manipulability of general multiple limb robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 215–228, 1995.

BUTTOLO, P.; HANNAFORD, B. Advantages of actuation redundancy for the design of haptic displays. In: *Proceedings ASME, Fourth Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, S. Francisco. 1995.

CHABLAT, D.; WENGER, P. Working modes and aspects in fully parallel manipulators. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. 1998. v. 3, p. 1964–1969.

CHABLAT, D.; WENGER, P. Architecture optimization of a 3-dof translational parallel mechanism for machining applications, the orthoglide. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 403–410, 2003.

CHABLAT, D. et al. The isoconditioning loci of planar three-dof parallel manipulators. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 2002. p. 601–606.

CHABLET, D.; WENGER, P.; ANGELES, J. The isoconditioning loci of a class of closed-chain manipulators. In: IEEE. *Robotics and*

Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on. 1998. v. 3, p. 1970–1975.

CHEDMAIL, P. *Synthèse de Robots et de Sites Robotisés modélisation de Robots Souples*. Tese (Doutorado), 1990.

CHIACCHIO, P.; BOUFFARD-VERCELLI, Y.; PIERROT, F. Evaluation of force capabilities for redundant manipulators. In: *IEEE. Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on.* 1996. v. 4, p. 3520–3525.

CHIACCHIO, P.; BOUFFARD-VERCELLI, Y.; PIERROT, F. Force polytope and force ellipsoid for redundant manipulators. *Journal of Robotic Systems*, Wiley Online Library, v. 14, n. 8, p. 613–620, 1997.

CHIACCHIO, P. et al. Global task space manipulability ellipsoids for multiple-arm systems. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 678–685, 1991.

CHIU, S. L. Task compatibility of manipulator postures. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Publications, v. 7, n. 5, p. 13–21, 1988.

DAS, S. et al. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 526–553, 2009.

DAS, S.; SUGANTHAN, P. N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 4–31, 2011.

DAVIES, T. Mechanical networks iii: Wrenches on circuit screws. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 107–112, 1983.

FARDANESH, B.; RASTEGAR, J. Minimum cycle time location of a task in the workspace of a robot arm. In: *IEEE. Decision and Control, 1988., Proceedings of the 27th IEEE Conference on.* 1988. p. 2280–2283.

FASSI, I.; LEGNANI, G.; TOSI, D. Geometrical conditions for the design of partial or full isotropic hexapods. *Journal of Robotic Systems*, Wiley Online Library, v. 22, n. 10, p. 507–518, 2005.

FINOTELLO, R. et al. Computation of kinetostatic performances of robot manipulators with polytopes. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on.* 1998. v. 4, p. 3241–3246.

FIRMANI, F. et al. Wrench capabilities of planar parallel manipulators. part i: Wrench polytopes and performance indices. *Robotica*, Cambridge Univ Press, v. 26, n. 06, p. 791–802, 2008.

GALLINA, P.; ROSATI, G.; ROSSI, A. 3-dof wire driven planar haptic interface. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Springer, v. 32, n. 1, p. 23–36, 2001.

GÄMPEL, R.; MÜLLER, S. D.; KOUMOUTSAKOS, P. A parameter study for differential evolution. *Advances in intelligent systems, fuzzy systems, evolutionary computation*, Interlaken, Switzerland: WSEAS Press, v. 10, p. 293–298, 2002.

GARG, V.; CARRETERO, J.; NOKLEBY, S. Determining the force and moment workspace volumes of redundantly-actuated spatial parallel manipulators. In: *Proceedings of the 2007 ASME Design Engineering Technical Conference ASME*. 2007. p. 4–7.

GOSSELIN, C.; ANGELES, J. Kinematic inversion of parallel manipulators in the presence of incompletely specified tasks. *Journal of Mechanical Design*, American Society of Mechanical Engineers, v. 112, n. 4, p. 494–500, 1990.

HUANG, T. et al. Optimal kinematic design of 2-dof parallel manipulators with well-shaped workspace bounded by a specified conditioning index. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 538–543, 2004.

HUANG, T.; WHITEHOUSE, D.; WANG, J. The local dexterity, optimal architecture and design criteria of parallel machine tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 346–350, 1998.

HWANG, Y.-S.; LEE, J.; HSIA, T. C. A recursive dimension-growing method for computing robotic manipulability polytope. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on.* 2000. v. 3, p. 2569–2574.

KLEIN, C. A.; BLAHO, B. E. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. *The International*

Journal of Robotics Research, Sage Publications, v. 6, n. 2, p. 72–83, 1987.

KOKKINIS, T.; PADEN, B. Kinetostatic performance limits of cooperating robot manipulators using force-velocity polytopes. In: *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting*. 1989. p. 151–155.

KRUT, S.; COMPANY, O.; PIERROT, F. Force performance indexes for parallel mechanisms with actuation redundancy, especially for parallel wire-driven manipulators. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*. 2004. v. 4, p. 3936–3941.

KRUT, S.; PIERROT, F. et al. Velocity performance indices for parallel mechanisms with actuation redundancy. *Robotica*, Cambridge Univ Press, v. 22, n. 02, p. 129–139, 2004.

KUMAR, V. R.; WALDRON, K. J. Force distribution in closed kinematic chains. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, IEEE, v. 4, n. 6, p. 657–664, 1988.

LEE, J. A study on the manipulability measures for robot manipulators. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*. 1997. v. 3, p. 1458–1465.

LEE, J.; SHIM, H. On the dynamic manipulability of cooperating multiple arm robot systems. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*. 2004. v. 2, p. 2087–2092.

LEE, S.; KIM, S. A self-reconfigurable dual-arm system. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*. 1991. p. 164–169.

LEGNANI, G. et al. The point of isotropy and other properties of serial and parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, v. 45, n. 10, p. 1407–1423, 2010.

LI, Z.; SASTRY, S. S. Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 32–44, 1988.

MEJIA, L. et al. Modified scaling factor method for the obtention of the wrench capabilities in cooperative planar manipulators. In: *14th IFToMM World Congress*. 2015.

- MEJIA, L.; SIMAS, H.; MARTINS, D. Force capability polytope of a 3rrr planar parallel manipulator. In: *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators.* : Springer, 2014. p. 537–545.
- MEJIA, L. e. o. otimização da capacidade de carga de um manipulador paralelo 3rrr simétrico em trajetórias com contato. 2012.
- MERLET, J.-P. Redundant parallel manipulators. *Laboratory Robotics and Automation*, Wiley Online Library, v. 8, n. 1, p. 17–24, 1996.
- MORENO, H. et al. Global optimization of performance of & 2prp parallel manipulator for cooperative tasks. In: *3rd International Conference on Informatics in Control.* 2006. p. 1–7.
- MORENO, H.; PAMANES, J. Isotropic design of a 2 dof parallel kinematic machine with a translational workpiece table. In: *13th World Congress in Mechanism and Machine Science.* 2011. p. 19–25.
- MORENO, H. A. et al. Indices de desempenho de robots manipuladores: una revision del estado del arte. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 111–122, 2012.
- NAHON, M. A.; ANGELES, J. Real-time force optimization in parallel kinematic chains under inequality constraints. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 439–450, 1992.
- NELSON, B.; DONATH, M. Optimizing the location of assembly tasks in a manipulator's workspace. *Journal of Robotic Systems*, Wiley Online Library, v. 7, n. 6, p. 791–811, 1990.
- NOKLEBY, S. et al. Force-moment capabilities of redundantly-actuated planar-parallel architectures. In: *12th IFToMM 2007 World Congress.* 2007. p. 17–21.
- NOKLEBY, S. B. et al. Force capabilities of redundantly-actuated parallel manipulators. *Mechanism and machine theory*, Elsevier, v. 40, n. 5, p. 578–599, 2005.
- PARK, F.; KIM, J. W. Manipulability of closed kinematic chains. *Journal of mechanical design*, American Society of Mechanical Engineers, v. 120, n. 4, p. 542–548, 1998.
- PYTEL, A.; KIUSALAAS, J. *Instructor's Solutions Manual for Engineering Mechanics, Statics Second Edition.* : Brooks/Cole, 1999.

RAHNAMEYAN, S.; TIZHOOSH, H. R.; SALAMA, M. M. Opposition-based differential evolution. *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 64–79, 2008.

ROCKAFELLAR, R. T. *Convex Analysis. Princeton landmarks in mathematics.* : Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997.

ROMANELLI, F. métodos avançados de interação do robô com o ambiente no sentido de um robô industrial conscientes do seu volume. *Journal of Robotics*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2011, 2011.

RONKKONEN, J.; KUKKONEN, S.; PRICE, K. V. Real-parameter optimization with differential evolution. In: *Proc. IEEE CEC*. 2005. v. 1, p. 506–513.

SALISBURY, J. K.; CRAIG, J. J. Articulated hands force control and kinematic issues. *The International journal of Robotics research*, SAGE Publications, v. 1, n. 1, p. 4–17, 1982.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modelling and control of robot manipulators.* : Springer Science & Business Media, 2012.

SIMAS, H. et al. Planejamento de trajetórias e evitamento de colisão em tarefas de manipuladores redundantes operando em ambientes confinados. Florianópolis, SC, 2008.

STORN, R. On the usage of differential evolution for function optimization. In: IEEE. *Fuzzy Information Processing Society, 1996. NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American.* 1996. p. 519–523.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997.

TAO, J. M.; LUH, J. Coordination of two redundant robots. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on.* 1989. p. 425–430.

TSAI, L.-W. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators.* : John Wiley & Sons, 1999.

UEBERLE, M.; MOCK, N.; BUSS, M. Vishard10, a novel hyper-redundant haptic interface. In: IEEE. *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proceedings. 12th International Symposium on.* 2004. p. 58–65.

WEIHMANN, L. et al. Force capabilities of kinematically redundant planar parallel manipulators. In: *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*. 2011. p. 483–483.

WEIHMANN, L. et al. Modelagem e otimização de forças e torques aplicados por robôs com redundância cinemática e de atuação em contato com o meio. Florianópolis, SC, 2011.

YOSHIKAWA, T. Manipulability of robotic mechanisms. *The international journal of Robotics Research*, Sage Publications, v. 4, n. 2, p. 3–9, 1985.

YOSHIKAWA, T. *Foundations of robotics: analysis and control*. : Mit Press, 1990.

ZAHARIE, D. Influence of crossover on the behavior of differential evolution algorithms. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 9, n. 3, p. 1126–1138, 2009.

ZANGANEH, K. E.; ANGELES, J. Kinematic isotropy and the optimum design of parallel manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, SAGE Publications, v. 16, n. 2, p. 185–197, 1997.

ZHANG, J.; SANDERSON, A. C. Jade: adaptive differential evolution with optional external archive. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 13, n. 5, p. 945–958, 2009.